

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
АССОЦИАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОТДЕЛОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ (АМО)
РОССИЙСКО-КИРГИЗСКИЙ КОНСОРЦИУМ ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ
АО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»
ФОНД ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ «НАДЁЖНАЯ СМЕНА»
МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ РНК СИГРЭ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

26–27 февраля 2026 г.

МОСКВА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



МОСКВА

НИУ «МЭИ»

2026

УДК 621.3+621.37[(043.2)]

P 154

- РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА:
P 154 Тридцать вторая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (26–27 февраля 2026 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2026. — 1211 с.

ISBN 978-5-907732-74-2

Помещенные в сборнике тезисы докладов студентов и аспирантов российских и зарубежных вузов освещают основные направления современной радиотехники, электроники, информационных технологий, электротехники, электромеханики, электротехнологии, ядерной энергетики, теплофизики и электроэнергетики.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей вузов и инженеров, интересующихся указанными выше направлениями науки и техники.

В отдельных случаях в авторские оригиналы внесены изменения технического характера. Как правило, сохранена авторская редакция.

ISBN 978-5-907732-74-2



9 785907 732742 >

© Авторы, 2026

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2026

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Ректор НИУ «МЭИ» **Н.Д. Рогалев** (председатель)

Проректор НИУ «МЭИ» **И.И. Комаров** (сопредседатель)

Первый проректор НИУ «МЭИ» **В.Н. Замолодчиков** (сопредседатель)

Проректор по международной деятельности НИУ «МЭИ» **А.Е. Тарасов**
(сопредседатель)

Доцент каф. ЭЭС НИУ «МЭИ» **Р.Р. Насыров** (сопредседатель, ответственный секретарь)

Директор ИЭТЭ НИУ «МЭИ» **М.Я. Погребисский** (член программного и оргкомитета)

Директор ИРЭ НИУ «МЭИ» **Р.С. Куликов** (член программного и оргкомитета)

Директор ИТАЭ НИУ «МЭИ» **А.В. Дедов** (член программного и оргкомитета)

Директор ИЭЭ НИУ «МЭИ» **В.Н. Тульский** (член программного и оргкомитета)

Директор ИВТИ НИУ «МЭИ» **С.В. Вишняков** (член программного и оргкомитета)

Директора ЭнМИ НИУ «МЭИ» **О.М. Митрохова** (член программного и оргкомитета)

Директор ИЭВТ НИУ «МЭИ» **И.А. Щербатов** (член программного и оргкомитета)

Директор ИнЭИ НИУ «МЭИ» **А.Ю. Невский** (член программного и оргкомитета)

Директор ИГВИЭ НИУ «МЭИ» **Т.А. Шестопалова** (член программного и оргкомитета)

Зав. каф. ИЭиОТ НИУ «МЭИ» **О.Е. Кондратьева** (член программного и оргкомитета)

Зав. каф. МЭП НИУ «МЭИ» **Н.Л. Кетоева** (член программного и оргкомитета)

Директор филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске **А.С. Федулов** (член программного и оргкомитета)

Директор филиала НИУ «МЭИ» в г. Волжский **М.М. Султанов** (член программного и оргкомитета)

Директор филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе **С.А. Абдулкеримов** (член программного и оргкомитета)

Директор филиала НИУ «МЭИ» в г. Конаково (Энергетический колледж)
Е.Е. Кузнецова (член программного и оргкомитета)

Доцент каф. ЭЭС НИУ «МЭИ» **Толба Мохамед Али Хассан** (член программного и оргкомитета)

Старший преподаватель каф. ЭЭС НИУ «МЭИ» **И.С. Анисимова** (член оргкомитета)

Заведующий ОВР ИВЦ НИУ «МЭИ» **А.О. Горбунова** (член оргкомитета)

Ведущий программист ОВР НИУ «МЭИ» **В.В. Лаврушко** (член оргкомитета)

Направление I

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Radio engineering and Electronics

Руководитель направления:

Директор института

радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова НИУ «МЭИ»

к.т.н., доцент

Куликов Роман Сергеевич

Секция 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

Theoretical basis of radio engineering

Председатель секции: к.т.н., доцент Шалимова Елена Владимировна

Секретарь секции: к.т.н. Балакин Дмитрий Александрович

М.Г. Иванов, студ.; рук. К.А. Вытовтов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ БПЛА

Интенсивное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и ограниченное покрытие глобальных навигационных спутниковых систем приводит к необходимости построения систем локальной навигации [1]. В связи с малой отражающей способностью и специфичными спектральными портретами БПЛА существующие локационные комплексы не способны эффективно решать данную задачу [2]. Ранее авторами была предложена радиолокационная станция, основанная на амплитудно-разностном методе пеленга угла прихода излучения [2]. Ее особенностью является наличие принципиально нелинейной дискриминационной характеристики. В данной работе проведен анализ устойчивости описанной станции и ее динамика при малых возмущениях. Переходной процесс угловой ошибки при скачкообразном изменении положения цели представлен на рис. 1. Моделирование проводилось при следующих параметрах: $k_{\text{Ад}}=250$ мВ/дБ, $\varphi_{\text{М}}=180$ град/В·с, $S^{\text{лог}}(\varphi)=1$ дБ/град.

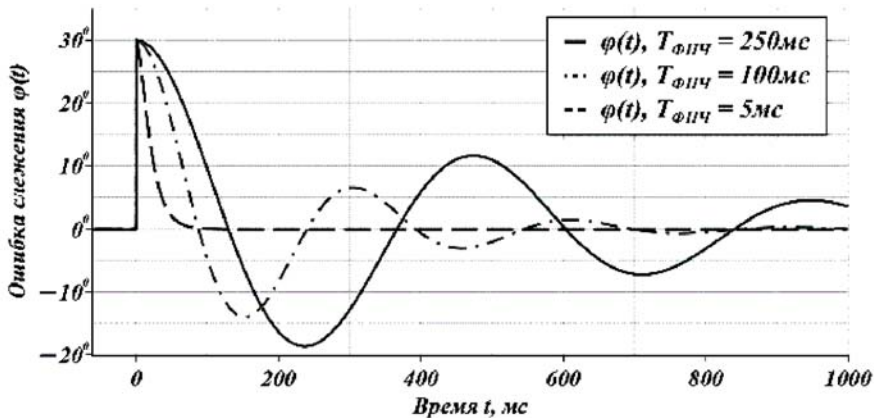


Рис. 1. Переходной процесс ошибки слежения при различных $T_{\text{ФНЧ}}$

Полученные результаты могут быть полезны при разработке и моделировании аналогичных нелинейных угломерных локоаторов и систем локальной навигации БПЛА.

Литература

1. Kulikova M.E., Drobkova O.S., Platonov P.V. Technological Progress in the Field of Unmanned Aerial Vehicles: Retrospective and Forecast // Proc. Of REEPE-2025, Moscow, Russia, 2025. P. 1–5.
2. Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Иванов М.Г. Локальная радиолокационная система навигации для привязных высотных платформ / Автоматизация в промышленности 2024. № 06.

М.Г. Иванов, студ.; рук. К.А. Вытовтов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБНАРУЖЕНИЯ И ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ БПЛА

Значительный прогресс в области радиотехники и электроники способствует повсеместному распространению беспилотных авиационных судов [1]. Вместе с тем актуальной задачей на сегодняшний день является разработка систем локальной навигации малых БПЛА. Ранее авторами была предложена реализация подобной системы [2], однако, экспериментальные испытания выявили критические недостатки, связанные с грубым угловым разрешением и малой областью удержания [3]. В связи с чем в данной работе описан метод повышения характеристик обнаружения и точности амплитудно-разностных угломерных локоаторов, основанный на введении между приемными антеннами устройства развязки. Последнее представляет собой слоистую поглощающую структуру, способную подавлять боковые и задние лепестки антенны соседнего канала в широком диапазоне длин волн и углов падения, благодаря чему происходит линеаризация пеленгационной характеристики, увеличение ее средней крутизны и, как следствие, повышение чувствительности и точности всей системы. В основе описанной структуры лежит метод согласования волновых импедансов свободного пространства и поглощающего слоя. Эффективность подавления определяется мощностными коэффициентами поглощения и отражения падающей электромагнитной волны на устройство развязки и на практике может составлять 30 дБ и более.

Предложенный метод применим к узконаправленным антеннам с выраженным главным лепестком и позволяет улучшить характеристики обнаружения без изменения структуры радиолокатора.

Литература

1. **Hashim H.A.** Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives //Results in Engineering. — 2024. — С. 103786.
2. **Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Иванов М.Г.** Метод построения радиолокационной системы поиска и сопровождения источника излучения диапазона 800 МГц — 5,8 ГГц / Материалы 8-й Международной научной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2024, Владикавказ). М.: ИПУ РАН, 2024. С. 275–276.
3. **Иванов М.Г., Вытовтов К.А.** Метод построения системы мониторинга электромагнитной обстановки L, S, C диапазонов частот / Труды 31-й конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МНТК 2025, Москва). М.: «МЭИ», 2025. Т. 31. С. 168–168.

М.Р. Акмалов, студ.; рук. Д.А. Балакин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИМИТАТОР КАНАЛА НАД МОРСКОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В КПМ РИТМ В СРЕДЕ ENGEE PTC

В работе представлена модель формирования линейно-частотно модулированного сигнала с учётом заранее рассчитанной морской подстилающей поверхности. В качестве сценария используется двумерная матрица рельефа, полученная на основе спектрального моделирования морской подстилающей поверхности согласно [1], что позволяет учитывать влияние волнения при изменении высоты, наклонной дальности и скорости движения цели.

Модель реализована в среде EngEE PTC [2], обеспечивающей динамическое изменение параметров ЛЧМ-сигнала и построение траектории цели. Модель функционирует в составе комплекса полунатурного моделирования РИТМ [3], что позволяет выполнять расчёты в режиме жёсткого реального времени. Для вывода сигнала в радиочастотный тракт используется модуль FMC9000, работающий в диапазоне 75 МГц — 6 ГГц и поддерживающий широкополосную передачу и приём [4].

Вклад автора заключается в построении структуры модели в среде EngEE PTC, адаптации матрицы подстилающей поверхности к требованиям генерации сигнала, реализации зависимости параметров ЛЧМ-сигнала от траектории цели и подготовке модели к работе в вычислительном контуре КПМ РИТМ.

Разработанный имитатор может использоваться для тестирования радиоприёмных устройств и анализа алгоритмов обработки при различных параметрах движения цели. Перспективой развития является расширение модели для аппаратно-ориентированных испытаний типа Hardware-in-the-Loop, а также увеличение числа каналов и поддерживаемых типов сигналов.

Литература

1. Балакин Д.А., Семенов В.Ю., Стельмах А.П., Тильки И.Г. Имитатор фоно-целевой обстановки над морской подстилающей поверхностью в среде ENGEE PTC // Журнал радиоэлектроники. 2025. № 10.
2. EngEE — российская платформа математических вычислений и динамического моделирования. URL: <https://start.engee.com/>
3. Комплекс полунатурного моделирования РИТМ — разработка аппаратного и программного обеспечения. URL: <https://kpm-ritm.ru/>
4. ALINX FH9000 16-bit/14-bit ADC RF AD9009 HPC FMC Card. ALINX Electronic Ltd. URL: https://en.alinx.com/Product/FMC-Cards/AD_DA_RF/FH9000.html

А.Е. Семичастнов, асп.; рук. Д.А. Балакин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

УТОЧНЕНИЕ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СРЕДЕ ENGEE

В эпоху стремительного технологического прогресса характеристики беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) постоянно совершенствуются, что приводит значительному уменьшению геометрических размеров БПЛА — сопоставимыми с размерами птиц. Для увеличения эффективности обнаружения и классификации БПЛА на основе моделей откликов отраженного сигнала от цели требуются более точная и детализированная геометрия системной модели БПЛА.

В работе [1] рассматривается способ моделирования диаграммы обратного рассеяния (ДОР) элементов БПЛА на основе разбиения геометрии на топологические примитивы, для которых известны аналитические выражения: соединение цилиндров описывает тело БПЛА, плоская пластина — лопасти. Экспериментальные исследования [2] показали, что аппроксимация ДОР лопасти винта в виде плоской пластины является слишком грубой для детального описания геометрии. Более точная модель лопасти винта представляется в виде совокупности точечных отражателей, расположенных на аппроксимирующих отрезках передней и задней кромок лопасти. Физический и цифровой прототип винта квадрокоптера Phantom DJI 3 представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид винта: (а) — физический, (б) — цифровой

В докладе рассматриваются этапы формирования и характеристики усовершенствованной модели винта с интеграцией в общую системную модель БПЛА. В качестве инструмента выступает среда EngEE [3].

Литература

1. **Д.А. Балакин, А.Е. Семичастнов, А.Р. Горбунов, М.Р. Акмалов** Повышение эффективности обнаружения БПЛА на основе радиолокационных данных с использованием нейросетевых методов // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA — 2025 : Доклады XXVII Международной конференции, Москва, 26–28 марта 2025 года. — Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2025. — С. 135–140.
2. **Е.С. Плотникая, С.Р. Гейстер, В.И. Веремьев.** Уточнение математической модели сигнала, отраженного от лопасти винта квадрокоптера, на основе экспериментальных исследований // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 73–85.
3. Электронный ресурс: <https://start.engee.com>

Н.А. Колесник, студ.; рук. Д.А. Балакин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ FMCW РАДАРОВ

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к неинвазивным диагностическим технологиям, что обусловлено повышением требований к безопасности, точности и комфорту медицинских обследований, а также необходимостью развития прецизионных методов контроля в промышленности и научных исследованиях. Среди перспективных направлений особое место занимают системы на основе FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) радаров, использующие частотную модуляцию непрерывного сигнала [1].

Проведенный анализ позволил систематизировать современные применения FMCW радаров в диагностических системах. В медицинской диагностике эти технологии успешно используются для мониторинга дыхательной активности и сердечного ритма, обнаружения новообразований, включая ранние стадии опухолевых процессов для непрерывного наблюдения за пациентами.

В промышленной сфере FMCW системы применяются для контроля уровня жидкостей и сыпучих материалов, мониторинга вибрационного состояния оборудования и диагностики строительных конструкций. В научных исследованиях эти системы открывают возможности для прецизионного анализа механических свойств материалов и изучения динамических процессов в реальном времени.

В работе приведена классификация диагностических FMCW систем по областям применения и техническим характеристикам, а также предложена архитектура универсальной диагностической платформы на базе чипа AWR1843.

Литература

1. **B. Elmakhzangy, F. Aziz, Y. ElZawahry, C. Maufroy, U. Schneider and M.F. Huber**, “Improved Multi-Person Vital Signs Estimation Algorithm in Sitting and Standing Positions using MIMO FMCW Radar,” // 2023 IEEE International Radar Conference (RADAR), Sydney, Australia, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/RADAR54928.2023.10371038.

М.Р. Цымбал, асп.; рук. Д.А. Балакин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ БПЛА С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В современном мире все чаще используются БПЛА (беспилотные летательные аппараты) в военных конфликтах из-за их малых размеров, низкой высоты полета и высокой эффективности. Вследствие этого возникает необходимость в обнаружении и классификации БПЛА. Для этого используются различные методы обнаружения: акустические, радиолокационные, оптические. У каждого из этих подходов есть свои преимущества и недостатки, которые подробно рассмотрены в работе [1].

В докладе описываются методы проектирования акустических систем детекции, представляющих собой антенную решетку, где в качестве антенных элементов выступают микрофоны. Микрофоны способны выделять из окружающих помех как характерный звук двигателей, так и шум вращения пропеллеров БПЛА.

Также в работе описаны используемые методы обработки акустических сигналов и предложены новые алгоритмы, позволяющие повысить качество классификации и обнаружения БПЛА.

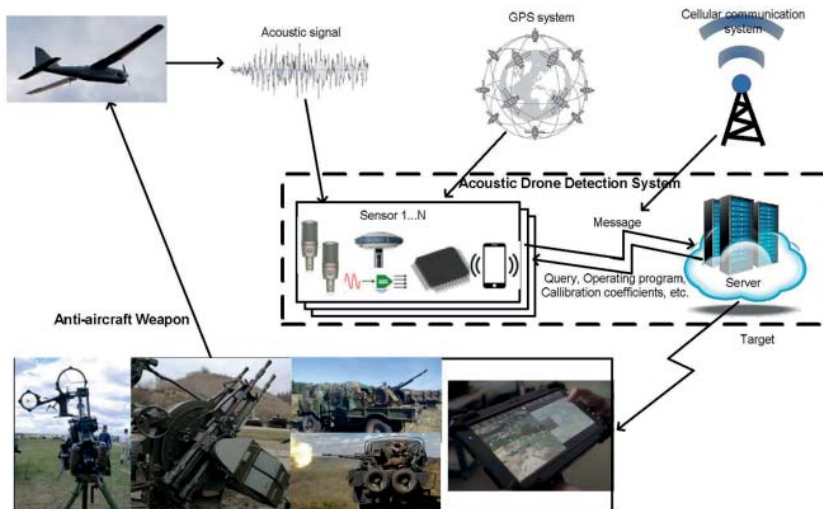


Рис. 1. Структурная схема обнаружения БПЛА с помощью акустического подхода

Литература

1. R. Kochan, N. Hots, S. Fabirovskyy, V. Storozh, A. Kosterov, L. Ozirkovskyy, A. Helesh, S. Arkadii, V. Kochan, B. Strykhalyuk, M. Mykyichuk, and I. Demydov, "Approach to acoustic drone detection system development," in 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), vol. 1, 2023, pp. 471–476.

В.А. Хлупнова, студ.; рук. В.С. Фланден, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТОВ

В диссертационной работе П. С. Колодина развиты экспериментально корректируемые компьютерные модели гексаферритовых гиромангнитных резонаторов на основе подхода независимых однодоменных зёрен. В данной работе этот подход обобщается на случай многокомпонентного композиционного материала.

Рассматривается композиционный материал, состоящий из слабомагнитной матрицы с проницаемостью $\hat{\mu}_m \approx \mu_0 \cdot \hat{I}$; распределённых частиц гексаферрита, каждая из которых рассматривается как однодоменное зерно с одноосной магнитной анизотропией.

На материал действует постоянное магнитное поле $\vec{H}_0$ и малое переменное поле $\vec{h}(t)$ с круговой частотой ω . Основная цель модели — получить тензор эффективной магнитной проницаемости композиции $\hat{\mu}_{eff}(\omega, \vec{H}_0)$, который далее может использоваться в расчётах ферромагнитного резонанса, мод собственных колебаний резонаторов, полос пропускания и затухания в устройствах КВЧ-техники.

При построении модели принимаются следующие предпосылки:

1. Размер частиц гексаферрита a много меньше длины волны в рассматриваемом диапазоне частот ($a \ll \lambda$), что позволяет применять аппарат эффективной среды.
2. Взаимодействием между частицами (магнитодипольным и обменным) пренебрегают, а каждая частица рассматривается как независимый резонатор, «встроенный» в матрицу.
3. Гексаферриты обладают одноосной анизотропией с осью лёгкого намагничивания $\vec{e}_K$; направление этой оси и магнитные параметры могут быть распределены.
4. В переменном поле рассматривается малый сигнал, что позволяет линеаризовать уравнение движения для вектора намагниченности.

Тензор проницаемости частицы принимаем как $\hat{\mu}_i^p = \mu_0 \cdot (\hat{I} + \hat{\chi}_i^p(\omega))$. Если ориентация частицы относительно лабораторной системы произвольная, тензор в лабораторных координатах получаем поворотом через матрицу поворота и углы Эйлера Ω $\hat{\mu}_{lab}^p = \hat{R}(\Omega) \cdot \hat{\chi}_i^p(\omega) \cdot \hat{R}^{-1}(\Omega)$.

Характерной особенностью реальных материалов является наличие нескольких фракций гексаферритовых частиц: с разным типом гексаферрита, разным размером, различными параметрами анизотропии и затухания. Разработанная модель учитывает эти особенности.

*Ю.Ю. Михайлова, студ.; И.А. Сукач., асп. (НИУ «МЭИ»);
рук. А.А. Меркулов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

В данной работе предлагается новый подход к созданию композиционного функционально-градиентного материала на основе биосовместимого полимера. Данный материал предназначен для отражения и поглощения электромагнитного излучения, а также возможно его использование для улучшения электромагнитной совместимости приборов. Разрабатываемый материал, в том числе, позволит экранировать полупространство антенны от человека в системах медицинского назначения.

Предлагаемый материал представляет собой слоистый функционально-градиентный композит на основе матрицы из биосовместимого полимера. Градиент свойств формируется за счет пространственного распределения функциональных наполнителей с высокими поглощающими и отражающими свойствами. Ключевая особенность — плавное изменение импеданса и коэффициента затухания по толщине материала, что минимизирует вторичное отражение и повышает эффективность экранирования в широком частотном диапазоне.

Для определения свойств материала проводилось компьютерное моделирование, аналитический расчёт свойств, а также эксперимент. Созданные на основе моделей образцы изучались как с помощью стандартных измерений в коаксиальных волноводах, так и на фантомах биологических тканей, имитирующих диэлектрические свойства человека. Сравнительный анализ данных моделирования и эксперимента позволит уточнить граничные условия и калибровки вычислительных алгоритмов.

Основное применение материала заключается в создании персональных экранирующих элементов для систем «антенна-тело» в носимых мониторах, кардиостимуляторах нового поколения и диагностических датчиках. Это позволит, с одной стороны, защитить пользователя от избыточного облучения, а с другой — повысить стабильность работы антенны за счет устранения помех от электропроводящих тканей организма, что напрямую ведет к улучшению электромагнитной совместимости и безопасности медицинских приборов.

Литература

1. Wang, Yuqi & Zhao, Wei & Tan, Linli & Li, Yingru & Qin, Liu & Li, Shidong. (2023). Review of Polymer-Based Composites for Electromagnetic Shielding Application. *Molecules*. 28. 10.3390/molecules28155628.

Секция 2

ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ И СИГНАЛОВ

Generation of oscillations and signals

Председатель секции: д.т.н., профессор Удалов Николай Николаевич

Секретарь секции: Чеченя Сергей Александрович

*А.Д. Ёлчев, студ., А.И. Гушин, асп.;
рук. Н.Н. Удалов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛНОСТЬЮ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ФАПЧ

В настоящее время актуальной задачей является разработка модели синтезатора частоты на основе полностью цифровой системы (ПЦС) фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Это обусловлено перспективами широкого применения данных устройств в спутниковой связи, радиолокации и системах Bluetooth Low Energy в связи с их значительным частотным диапазоном, низким энергопотреблением и малыми габаритами.

Модель синтезатора состоит из цифрового частотно-фазового детектора, время-цифрового преобразователя (ВЦП), цифрового петлевого фильтра (ЦПФ), генератора с цифровым управлением (ГЦУ) и делителя частоты. По сравнению со структурой [1] в предлагаемой модели использован генератор с цифровым управлением (ГЦУ), включающий делитель частоты с постоянным коэффициентом деления. Это обусловлено необходимостью генерировать одну фиксированную частоту.

Главным элементом новизны является изменение метода расчета коэффициентов ЦПФ. Вместо билинейного z-преобразования на основе аналогового прототипа применено проектирование программными средствами с заданием исходных данных. Последние соответствуют параметрам для расчета фильтров в импульсной системе ФАПЧ [2]. Кроме того, включен новый преобразователь типа данных, формирующий целочисленные коды на выходе цифрового фильтра. Это обеспечивает совпадение данных кодов по типу и разрядности с сигналом ВЦП и появление побочных спектральных составляющих (ПСС) в спектре выходного сигнала ГЦУ.

В результате моделирования измеряются частота и уровень ПСС, а также уровень фазовых шумов на выходе ГЦУ. Кроме того, по осциллограмме на выходе ЦПФ в докладе представлена оценка скорости переходного процесса по частоте и фазе генератора с цифровым управлением.

Литература

1. **Опанасенко, А.А.** Цифровой синтезатор частоты на основе кольца фазовой автоподстройки частоты / А.А. Опанасенко, Н.Н. Удалов // Радиотехника, электроника и энергетика: XXVI-я междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12–13 марта 2020 г., г. Москва): тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2020. — С. 21.
2. **Гушин, А.И.** Динамика синтезаторов частот на основе систем ФАПЧ с частотно-фазовым детектором / А.И. Гушин, Н.Н. Удалов // Радиотехника, электротехника и энергетика: XXXI-ая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (13–15 марта 2025 г., г. Москва): тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2025. — С. 12.

В.С. Гусева студ.; рук. С.А. Чеченя, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РЕЗОНАТОР ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР) центров азотных вакансий (*англ.* NV-центры) в алмазе используется в магнитометрии и квантовой сенсорике. Ансамбли из магнитометров, работающих на эффекте ОДМР, могут обеспечивать чувствительность порядка [нТл / $\sqrt{\text{Гц}}$] при комнатной температуре, что позволяет изучать магнитные структуры и регистрировать слабые биомagnetные поля [1].

Для возбуждения ОДМР необходимо обеспечить в области алмаза с NV-центрами однородное переменное магнитное поле с индукцией B_1 на частоте нулевого расщепления спиновых подуровней f_0 или в её непосредственной окрестности. Для подведения СВЧ-поля используются различные типы микроволновых резонаторов и антенн. Выбранный тип структуры должен: а) удовлетворять указанному условию однородности переменного поля; б) быть воспроизводимым и в) обеспечивать доступ к алмазу для подачи на него лазерного излучения [2].

В настоящей работе спроектирован и изготовлен макет СВЧ-резонатора с Ω -образной петлей, в котором $B_1 = 4,6$ А/м позволяет управлять спиновыми переходами NV-центров при подводимой мощности излучения 1 мВт, описана теоретическая модель резонатора, подобраны его размеры, проведено электромагнитное моделирование системы. В результате на печатной плате изготовлен копланарный Ω -резонатор частоте $f_0 = 2,87$ ГГц (рис. 1), сопоставлены его расчётные и экспериментальные S-параметры для минимума, коэффициента отражения $|S_{11}|$ с нагруженной добротностью $Q_H = 44,2$, который можно использовать в ОДМР-магнитометрах.

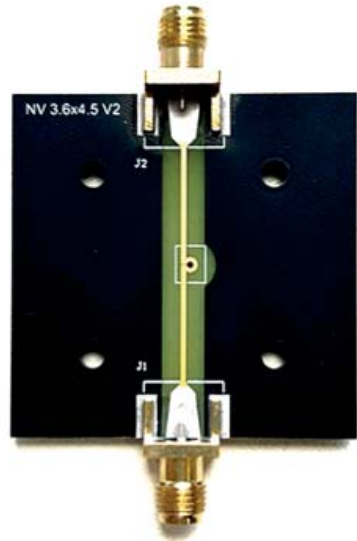


Рис. 1. Изготовленный резонатор на печатной плате

Литература

1. Xu Y., Hou J., Wang Z. et al. // Photonics Research, 2023. — Vol. 11. — № 3. — P. 393. — DOI: 10.1364/PRJ.11.000393.
2. Yaroshenko V.V., Soshenko V.V., Vorobyov V.V. et al. // Rev. Sci. Instrum., 2020. — Vol. 91. — № 3. — Article No. 035003. — DOI: 10.1063/1.5129863.

*Д.П. Пелехова, студ.;
рук. Е.М. Тороина, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ

Сверхширокополосные импульсы (СШИ) (*англ.* UWB — Ultra-Wideband) с занимаемой полосой, сравнимой с их средней частотой, находят применение в зависимости от диапазона частот и длительности: в радиолокации, сверхширокополосной связи, рефлектометрии и в умножителях частоты высокой кратности для силовой электроники, испытательной техники и ультразвуковых систем используют наносекунды; в СВЧ-диапазоне — от единиц до сотен пикосекунд; в оптическом диапазоне для телекоммуникаций, хирургии и научных исследований применяют импульсы фемто- и пикосекундной длительности.

Для генерации сверхкоротких импульсов применяются полупроводниковые диоды с усложненной структурой. Обычно в таких кристаллах между сильно легированными p^+ - и n^+ -слоем находится слой слаболегированного полупроводника для формирования широкого обедненного слоя с однородным внутреннем полем. На такой структуре строится ряд компонентов разного назначения. Для генерации СШИ обычно используются лавинные диоды, в которых короткий импульс формируется за счет быстрого перехода диода из закрытого режима в режим пробоя или диоды с резким восстановлением (ДРВ) (*англ.* SRD — Step Recovery Diode). В них короткие импульсы формируются за счет быстрого накопления и рассасывания свободных носителей в слаболегированной области структуры. При работе с СШИ используются p - i - n диоды, которые имеют существенно большее время рассасывания заряда и используются, в основном, для коммутации сигналов. Различия в структурах этих диодов определяют их динамические характеристики и области применения.

В докладе рассмотрены физические процессы в лавинных диодах, ДРВ и p - i - n диодах, проведено сравнение их характеристик и возможностей.

Выполнено компьютерное моделирование и проведен сравнительный анализ динамических характеристик формирователей СШИ на различных типах полупроводниковых диодов. Сформулированы рекомендации по их выбору для конкретных прикладных задач.

Литература

1. **Грехов, И.В.** Генерация мощных наносекундных импульсов с помощью полупроводниковых размыкателей тока / И.В. Грехов, И.В. // Изв. РАН. Сер. Энергетика. — 2000. — № 1. — С. 53–61.
2. **Гуртов, В.А.** Твердотельная электроника: учеб. пособие / В.А. Гуртов // — 3-е изд., доп. — М.: Техносфера, 2005. — 512 с.
3. **Кочемасов, В., Кирпиченков, А.** Твердотельные СВЧ-переключатели. Часть 1 // Электроника: Наука, технология, бизнес. — 2018. — № 1 (172). — С. 92–97.

С.А. Винокуров, асп.;
рук. А.Р. Сафин, д.ф-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ МАГНОННОГО КРИСТАЛЛА НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА И ШУМОВ В ОСЦИЛЛЯТОРЕ С ЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Автогенераторы с задержанной обратной связью демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики в сравнении с генераторами со сосредоточенными параметрами, включая низкий уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов и широкий диапазон перестройки частоты [1]. Однако, параметры ключевых компонентов задержанной обратной связи, таких как пленки железомитриевого граната (ЖИГ), критически зависят от технологических факторов, что ограничивает их применение. Модификация пленок ЖИГ посредством формирования одномерных магнонных кристаллов представляет перспективный подход к оптимизации характеристик задержанной обратной связи [2]. Несмотря на потенциал магнонного кристалла в улучшении временных и энергетических параметров пленочных ЖИГ, их влияние на параметры автогенератора и генерируемого сигнала, в частности, при использовании в качестве линии задержки, недостаточно изучено.

В настоящей работе исследуется влияние магнонного кристалла на параметры автогенератора с задержанной обратной связью, а также проводится анализ спектральной плотности мощности амплитудных и фазовых шумов генерируемого сигнала.

В результате выяснено, что магнонный кристалл, интегрированный в автогенератор с задержанной обратной связью, демонстрирует существенное влияние на параметры генерируемого сигнала, в частности, на амплитуду, фазу и частоту. Увеличение параметра связи между падающей и отраженной волнами в кристалле приводит к росту спектральной плотности мощности амплитудного и фазового шумов. При этом, расширение запрещенной зоны, обусловленное периодической структурой кристалла, способно вызывать ослабление или полное подавление сигнала на определенных частотах, что открывает возможности для использования магнонных кристаллов не только в качестве линий задержки, но и в качестве режекторных фильтров в СВЧ-устройствах.

Литература

1. **Rubiola, E.** Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators. — Cambridge University Press, 2009. — P. 228.
2. **Высоцкий, С.Л.** [и др.] Поверхностные спиновые волны в одномерных магнонных кристаллах с двумя пространственными периодами // Письма в Журнал технической физики, 2015. — Т. 41. — № 22. — С. 66–73.

Е.С. Папоян, студ.; рук. Л.А. Цырульникова, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИНДУКТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПИНТРОННОГО НАНООСЦИЛЛЯТОРА

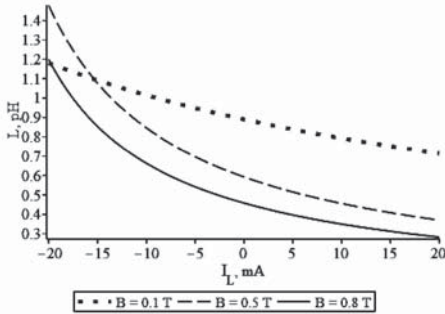


Рис. 1. Зависимость индуктивности катушки от проходящего через неё тока при различных значениях индукции магнитного поля B

Слончевского. Свободный слой СО в геометрии «легкая плоскость» может быть представлен как нелинейный LC-контур [1]. Дифференциальная индуктивность и ток через эквивалентную катушку зависят от азимутального угла и прецессии вектора намагниченности [2]. Получена (см. рис. 1) зависимость индуктивности L эквивалентного колебательного контура СО от значения тока I_L для малосигнального режима при вариациях магнитной индукции B . Характеристика $L(I_L)$ демонстрирует нелинейное уменьшение индуктивности при увеличении тока и возрастание её крутизны с увеличением индукции внешнего магнитного поля.

Проведенное исследование дает основу для дальнейшего схемотехнического SPICE-анализа спинтронных наносцилляторов в режиме малого сигнала.

Литература

1. **Physics-Based Circuit Model** for Magnetic Tunnel Junctions/ S. A. Louis [et al.] // — IEEE Magnetics Letters, 2025. — Vol. 16. — Art. no. 4500305. — DOI: 10.1109/LMAG.2025.3577475.
2. **Louis S., Bradley H., Tyberkevych V.** Equivalent Electric Model of a Macrospin // arXiv:2503.20811 [cond-mat.mes-hall], 2025. — DOI: 10.48550/arXiv.2503.20811.

Р.И. Соловьев, асп.;

рук. Е.А. Марфин, к.т.н., доц. (КФУ, ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ПЛАСТОВЫХ ФЛЮИДОВ

Повышение нефтеотдачи является основной задачей нефтяной отрасли. Акустическое воздействие рассматривается как перспективный метод, снижающий вязкость и изменяющий межфазное натяжение пластовых флюидов [1, 2]. Однако физика процессов изучена недостаточно, а имеющиеся данные зачастую противоречивы из-за различий в экспериментальных методах. Таким образом, актуальной задачей является создание универсального лабораторного комплекса для исследования влияния параметров акустического поля (частота, интенсивность, форма сигнала, время) на динамическую вязкость и поверхностное натяжение модельных и натуральных нефтяных систем.

Разработанная установка (рис. 1) состоит из основных модулей: 1) генератор синусоидальных электрических сигналов (ГС); 2) фильтр высоких частот (ФВЧ); 3) широкополосный усилитель мощности (УМ) на биполярных транзисторах (от 100 Гц до 100 кГц); 4) повышающий трансформатор (Тр); 4) пьезоэлектрический преобразователь (ПП), погружаемый в исследуемый флюид или контактирующий с кюветой. Новизна работы состоит в интеграции установки в единый измерительный цикл высокоточных методов контроля реологических (вискозиметр, ротационный реометр) и поверхностных (метод лежащей капли) свойств непосредственно до, во время и после воздействия.

Таким образом, разработанный лабораторный комплекс позволяет исследовать влияние упругих волн на реологические и поверхностные свойства различных флюидов, что будет способствовать разработке акустических методов повышения нефтеотдачи пластов.

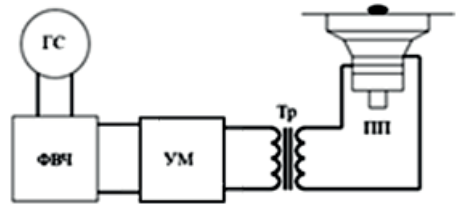


Рис. 1. Блок-схема установки

Литература

1. Лоскутова, Ю.В. Воздействие физических полей на высокосмолистую нефть / Ю.В. Лоскутова, А.В. Морозова, Г.И. Волкова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия. 2021. Т. 14. № 2. С. 226–233.
2. Муллакаев, М.С. Ультразвуковое регулирование вязкоупругих свойств нефтяных дисперсных систем / М.С. Муллакаев, Р.М. Муллакаев, И.Б. Есипов // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 3. С. 322–329.

А.О. Ходакова, асп.; рук. Д.А. Фролов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ НОВЫХ СПЕКТРАЛЬНО И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ FTN, SEFDM И NOMA

Рост требований к непрерывному широкополосному доступу и связи для устройств Интернета вещей делает актуальным развитие наземных сетей связи (*англ.* NTN — Non-Terrestrial Network), где узлы размещаются на спутниках и высотных стратосферных платформах (*англ.* HAPS — High-altitude platform station). Такие системы востребованы для малонаселённых и труднодоступных районов, а также при чрезвычайных ситуациях, однако работают при жёстких ограничениях по полосе частот и энергетике бортового ретранслятора, чувствительны к доплеровскому сдвигу и нелинейности усилителя мощности.

Цель работы — сопоставить варианты повышения спектральной эффективности в подобных условиях с сигналами: а) с преднамеренной межсимвольной интерференцией (*англ.* FTN — Faster-Than-Nyquist); б) со спектрально-эффективным частотным мультиплексированием (*англ.* SEFDM — Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing); в) с неортогональным множественным доступом по мощности (*англ.* NOMA — Non-Orthogonal Multiple Access). В FTN символы намеренно уплотняются во времени выше предела Найквиста, в SEFDM поднесущие располагаются плотнее друг к другу, чем в сигнале с ортогональными несущими, а в NOMA несколько пользователей делят между собой один и тот же частотно-временной ресурс, различаясь по уровню мощности.

Сравнение проводится на модели радиолинии «HAPS — наземный терминал» в канале с аддитивным белым гауссовым шумом и дополнительным учётом доплеровского сдвига. Критериями качества выступают спектральная эффективность η , требуемое отношение мощности сигнала и шума для заданной вероятности битовой ошибки.

В докладе представлены описания каждого из сигналов и их сравнительный анализ. Сформулированы выводы по целесообразности использования каждого из них для системы связи. Показано, что выигрыш по η для сигналов FTN и SEFDM сопровождается появлением межсимвольных и межканальных помех, усложнением приёмника и ужесточением требований к синхронизации, а структура NOMA целесообразна в многопользовательском режиме при разнесении их по мощности и возможности последовательного подавления помех.

Литература

1. Abbasi O., A. Yadav, H. Yanikomeroğlu et al. // IEEE Wireless Communications. — 2024. — Vol. 31, № 3. — P. 324–331. — DOI: 10.1109/MWC.012.2200365.

Секция 3

УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ

Radio signal processing devices

Председатель секции: к.т.н., доцент Остапенков Павел Сергеевич

Секретарь секции: Филатов Виктор Александрович

Н.А. Зельницкий, студ.;

рук. В.Б. Сучков, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ В АВТОМОБИЛЬНОМ РАДИОЛОКАТОРЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ МНОГОТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЦЕНЫ

В работе рассмотрена задача обнаружения движущихся целей в автомобильной РЛС мм-диапазона, путем метаматематического моделирования входного сигнала радиолокационного датчика [1]. Радиолокационная сцена моделируется наборами точечных рассеивателей: автомобиль Audi на шероховатой дороге длиной 200 м, на обочине дороги находится кустарник. Исследования проводилось для следующих параметров ЛЧМ сигнала: несущая 77 ГГц, полоса 75 МГц период повторения 33 мкс, тип системы — непрерывная; разрешение по дальности 2 м при максимальной дальности 200 м. Диапазон скоростей $-30 \dots 30$ м/с при разрешении 1 м/с. Детектирование реализовано на основе методов постоянного уровня ложной тревоги (CFAR) различных вариаций (CA/CSH/OS). Произведена оценка вероятности правильного обнаружения как функции ОСШ для многоточечной модели радиолокационной сцены. Показана применимость подхода для автомобильных РЛС мм-диапазона в условиях сложной фоноцелевой обстановки.

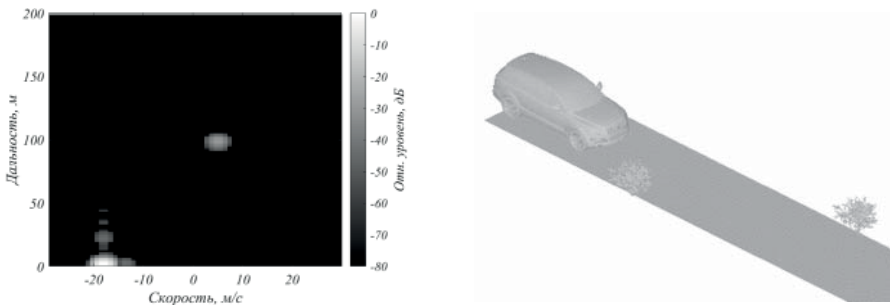


Рис. 1. Зависимости вероятности правильного обнаружения от ОСШ для различных методов CFAR, модель радиолокационной сцены

Разработанный алгоритм обнаружения на основе CFAR для непрерывной ЛЧМ РЛЧ показывает возможность полноценного использования многоточечных моделей целей и фоновой обстановки для моделирования входного сигнала радиолокационной системы.

Литература

1. **Сучков В.Б.** Метод определения входных сигналов бортовых систем ближней радиолокации от объектов сложной формы на основе использования их полигональных и многоточечных моделей // Спецтехника и связь. 2013. № 3.

К.А. Малиновский, студ.; рук. В.А. Филатов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 3-Х МЕРНЫХ МИКРОСБОРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА

Актуальность работы обусловлена тенденцией на миниатюризацию электроники, которая сталкивается с физическими ограничениями классических двухсторонних электронных сборок на печатных платах [1]. В качестве альтернативного решения предлагается создание 3-х мерной микросборки с послойной компоновкой элементов и инновационной коммутацией на основе токопроводящих жидкостей, что открывает путь к новому уровню плотности монтажа.

Проведена разработка и испытание прототипа 3-х мерной микросборки, изготовленной на 3D-принтере. В ходе исследования решались следующие задачи: проведение патентного поиска, анализ и выбор токопроводящих чернил, проектирование электронной и механической частей, разработка ПО и функциональные испытания. Проведен анализ коммерчески доступных токопроводящих чернил [2]: собраны специализированные стенды и проведены детальные измерения электрофизических свойств составов различной рецептуры. По результатам сравнительных испытаний отобран наиболее перспективный материал, демонстрирующий оптимальное сочетание проводимости и стабильности. Для отладки алгоритмов управления разработана и изготовлена двумерная тестовая плата, использовавшаяся в качестве прототипа.

Заключительным этапом работы стало аддитивное изготовление экспериментального образца 3-х мерной микросборки (рис.1) и проведение функционального контроля, которые подтвердили работоспособность устройства и применимость технологии.

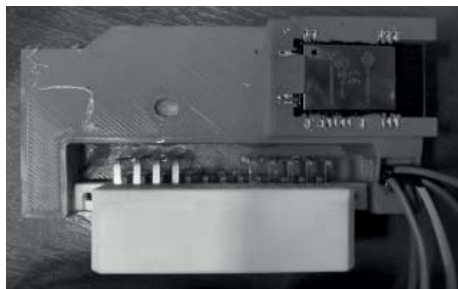


Рис. 1. 3-х мерная микросборка, напечатанная на 3D-принтере

Литература

1. Wakefield, E. 3D printing improves the efficiency of thermoelectric materials // Voxelmatters — URL:<https://www.voxelmatters.com/3d-printing-improves-the-efficiency-of-thermoelectric-materials/> — Текст: электронный
2. Tajsyя Электропроводящие чернила от японцев // pikabu — URL:https://pikabu.ru/story/yelektroprovodyashchie_chernila_ot_yapontsev_4352971 — Текст: электронный

Зин Ко Лин, студ.; рук. В.А. Филатов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ IOT

Развитие технологий Интернета вещей (IoT) открыло новые возможности для создания интеллектуальных телеметрических систем, объединяющих сенсоры, микроконтроллеры и облачные сервисы.

В докладе рассматривается разработка IoT-системы для мониторинга температуры и управления нагрузкой, обеспечивающая локальный и удалённый доступ. Система использует полупроводниковый аналоговый датчик температуры TMP36, который формирует аналоговый сигнал напряжения, измеряемого микроконтроллером PIC18F2520. Для отображения информации используется жидкокристаллический дисплей (16 знаков×2).

Для многоуровневого дистанционного доступа применяются два радиомодуля: модуль HC06 (Bluetooth) для локального обмена данными и модуль ESP-01s (Wi-Fi) для передачи данных в облако через платформу Blynk [1]. Система позволяет управлять исполнительными устройствами, такими как вентиляторы или нагреватели, в зависимости от температуры. Управление и передача данных между микроконтроллером и радиомодулями осуществляется по протоколу USART.

Преимущества системы включают небольшую стоимость комплектующих, простоту эксплуатации и возможность масштабирования. Потенциальные области применения — «умный дом», промышленный мониторинг, медицинские учреждения и сельское хозяйство. Интеграция с облачными платформами открывает перспективы для использования искусственного интеллекта и предиктивной аналитики.

Программное обеспечение для микроконтроллера разработано на языке C в среде проектирования MPLAB. Проектирование схемы устройства, моделирование его работы и отладка программного обеспечения выполнялась с использованием программы Proteus. По принципиальной схеме был разработан и собран конструктив в виде печатной платы. Разработка выполнялась с использованием программы KiCad.

В докладе приводятся результаты проведенной разработки, выполненного моделирования и экспериментальных исследований системы управления температурой в макетном исполнении.

Литература

1. **Blynk IoT Platform.** Blynk Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blynk.io> (дата обращения: 15.10.2025).

Я.В. Вознесенский, студ.; рук. В.А. Филатов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТА УПРАВЛЕНИЯ НА ПЛИС ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Проектирование устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) сегодня как никогда актуально, поскольку позволяет создавать энергоэффективные, высокопроизводительные и гибкие решения. Благодаря этому оно находит применение в самых передовых и требовательных технологических областях.

В докладе, на примере проектирования автомата управления, который реализует протоколы обмена данными между блоками памяти и вычислений в радиолокационной станции, показаны следующие этапы проектирования устройств на ПЛИС:

- постановка задачи и ее анализ,
- выбор метода проектирования и платформы,
- разработка блок-схемы и алгоритма работы устройства,
- формирование HDL-описания в программной среде Vivado [1],
- отладка алгоритма,
- синтез схемы и имплементация на кристалле ПЛИС,
- генерирование файла Bitstream для конфигурирования ПЛИС.

Спроектированное устройство работает на тактовой частоте 100 МГц, скорость передачи информации 115,2 кбод, диапазон рабочих температур от минус 40°C до 100°C. Блок-схема устройства представлена на рисунке 1.

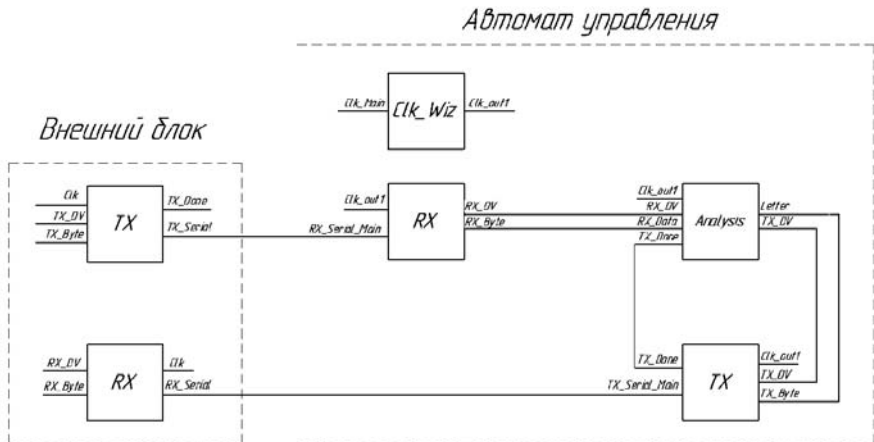


Рис. 1. Блок-схема автомата управления радиолокационной станции

Литература

1. Суворова, Е.А. Проектирование цифровых систем на VHDL / Е.А. Суворова, Ю.Е. Шейнин. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003.

Э.П. Алейникова, студ.; рук. В.А. Филатов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АКТИВНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ПРОБНИК НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Современные импульсные источники питания характеризуются высокими скоростями переходных процессов и наличием синфазных помех, что осложняет проведение точных измерений их параметров. Стандартные осциллографические пробники, не обладающие гальванической развязкой, способны образовывать короткозамкнутые контуры по проводу заземления, приводящие к потенциально опасным ситуациям и авариям. Существующие активные пробники с дифференциальным входом часто обладают высокой стоимостью и избыточной полосой пропускания [1], что препятствует их повсеместному использованию.

В работе предложена конструкция дифференциального пробника на основе инструментального операционного усилителя [2]. Его ключевыми особенностями являются увеличенный диапазон входных напряжений и широкая полоса частот. При этом дифференциальный усилитель с малыми входными токами обеспечивает высокое входное сопротивление, заданный коэффициент усиления и ослабление синфазной составляющей. Активная схема дифференциального усилителя формирует на своем выходе сигнал, пропорциональный разности потенциалов между двумя измерительными входами. Питание схемы осуществляется от однополярного стабилизированного источника.

В докладе приведен сравнительный анализ параметров существующих измерительных активных пробников. Предложена принципиальная схема и топология печатной платы дифференциального пробника. Разработан и изготовлен экспериментальный образец, проведены его лабораторные испытания. Дана оценка основных метрологических характеристик, таких как полоса пропускания, коэффициент подавления синфазного сигнала и электрическая прочность.

Литература

1. **Корнеев С.** Активные широкополосные дифференциальные пробники LeCroy серии WaveLink // Компоненты и Технологии. 2011. № 12.
2. **Antolín-Cañada, D.; Perez-Cebolla, F.J.; Eneriz, D.; Calvo, B.; Medrano, N.** Remote Low-Cost Differential Isolated Probe for Voltage Measurements. Appl. Sci. 2024, 14, 589.

*Кьо Зин Хтайк, студ.;
рук-ли Л.Т. Сазонова, к.т.н., доц.,
А.Я. Кулибаба, асс. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАРЫ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МИКРОСХЕМЫ

Параметр температуры один из самых важных факторов, влияющих на функционирование радиоэлектронной аппаратуры и проведение различных технологических процессов. Измерение этого параметра в широком диапазоне с высокой точностью — важная техническая задача.

Приведено проектирование устройства измерения температуры, в котором использовалась специализированная микросхема нормирующего преобразователя MAX6675 [1] и микроконтроллер STM32F767 [2]. В устройстве в качестве первичного преобразователя температуры использована выносная термопара типа К, которая работает в температурном диапазоне от 0 °С до 1100 °С и обладает линейным температурным коэффициентом изменения напряжения 41 мкВ/°С. Микросхема MAX6675 предназначена для работы с термопарами К-типа. Она обеспечивает усиление сигнала термопары встроенными операционными усилителями, преобразование усиленного аналогового сигнала в цифровую форму при помощи аналого-цифрового преобразователя с разрядностью 12 бит. Управление микросхемой и передача цифровых данных на микроконтроллер выполняется по последовательному интерфейсу SPI. Микросхема MAX6675 имеет функцию компенсации изменения температуры холодного спая термопары (места соединения свободных концов проводников термопары и входа микросхемы) за счет встроенного температурного датчика.

Для считывания данных с микросхемы MAX6675 используется отладочная плата NUCLEO-F767ZI с микроконтроллером STM32F767. Для разработки и отладки программного обеспечения изготовлен экспериментальный макет устройства, собран лабораторный стенд с персональным компьютером. Проведён контроль функционирования разработанного устройства. Основные результаты разработки устройства для измерения температуры приведены в докладе.

Литература

1. MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0 °C to +1024 °C) [Электронный ресурс] URL: https://download.mikroe.com/documents/datasheets/MAX6675_datasheet.pdf (дата обращения: 24.11.2025).
2. Микроконтроллер STM32F765xx [Электронный ресурс] URL: <https://st.com/resource/en/datasheet/DM00273119.pdf> (дата обращения: 24.11.2025).

*Тейн Тан Хтун, студ.;
рук-ли Л.Т. Сазонова, к.т.н., доц.,
А.Я. Кулибаба, асс. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МИКРОСХЕМЫ

Емкостные датчики находят широкое применения в различных технологических областях. В работе для точного измерения изменения малой ёмкости используется специализированная микросхема AD7746 [1] и микроконтроллер STM32F767 [2]. Разработанное устройство может быть использовано совместно с емкостными датчиками, например, для мониторинга относительной влажности воздуха, контроля микроперемещений, определения свойств диэлектрических материалов и др.

Микросхема AD7746 представляет собой 24-битный сигма-дельта преобразователь емкости в цифровой код. Измеряемая емкость подключается между выходом источника возбуждающего сигнала и входом сигма-дельта модулятора. Возбуждающий сигнал представляет собой меандр, а преобразователь измеряет заряд, проходящий через емкость. Цифровые данные с выхода преобразователя поступают на цифровой фильтр, затем масштабируются, умножаются на калибровочные коэффициенты, после чего передаются по последовательной шине I²C к микроконтроллеру. Микросхема AD7746 позволяет измерять изменение емкости в диапазоне $\pm 4,096$ пФ со средним значением до 17 пФ.

Для создания макета устройства использовался отладочный модуль EVAL-CN0552-PMDZ. В нём дополнительно содержится схема с операционным усилителем и резистивным делителем, которая позволяет расширить измеряемый диапазон изменения емкости до ± 50 пФ со средним значением до 200 пФ. Для считывания данных с модуля EVAL-CN0552-PMDZ использовался отладочный модуль NUCLEO-F767ZI с микроконтроллером STM32F767. Для программирования и отладки программного обеспечения для микроконтроллера и проверки функционирования устройства создан экспериментальный макет, в состав которого входят два модуля и персональный компьютер со средой для программирования микроконтроллера. Проведена экспериментальная проверка функционирования устройства с емкостными датчиками различного типа. В докладе приводятся основные результаты выполненной разработки.

Литература

1. 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7746 [Электронный ресурс] URL: <https://static.chipdip.ru/lib/330/DOC030330225.pdf> (дата обращения: 24.11.2025).
2. STM32F765xx [Электронный ресурс] URL: <https://st.com/resource/en/datasheet/DM00273119.pdf> (дата обращения: 24.11.2025).

Зо Тун, студ.; рук. А.А. Семкин, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ КАСКАДНОЙ И НЕКАСКАДНОЙ РЕАЛИЗАЦИЙ АКТИВНЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В работе рассмотрены два метода реализации активных фильтров высокого порядка: каскадный и некаскадный метод реализации на идентичных звеньях. Целью работы является помочь разработчикам аналоговых активных избирательных устройств в выборе той или иной структуры, сделав акцент на их достоинствах и недостатках.

Расчеты каскадных фильтров по заданным характеристикам можно выполнять с помощью компьютерных программ MICRO-CAP [1]. С помощью аналогичных компьютерных программ, выполняют моделирование синтезированного устройства. Преимущества каскадного метода реализации избирательных устройств заключаются в минимальном количестве активных элементов (ОУ), низком энергопотреблении, простоте и скорости расчета с помощью специальных программ. На кафедре ФОРС НИУ «МЭИ» разработан метод некаскадной реализации фильтров высокого порядка на идентичных звеньях [2]. По заданным требованиям к АЧХ фильтра и выбранной аппроксимирующей функции синтезируется структура на идентичных звеньях первого или второго порядков. Параметры звеньев определяют параметры всего фильтра, а обратные связи формируют форму АЧХ.

В работе были синтезированы активные полосовые фильтры с $f_c = 60$ кГц, $Q = 5$, коэффициентом усиления (G) 20 дБ, аппроксимирующей функции Чебышева 2-го порядка с неравномерностью в полосе пропускания 2 дБ каскадной и некаскадной структур. Проведен выбор звеньев и расчет номиналов элементов схем. С помощью программы MICRO-CAP проанализированы искажения АЧХ и влияние отклонений в некаскадной структуре АЧХ. Проведен расчет нелинейных искажений для каскадной и некаскадной реализаций полосового фильтра. Для рассмотренных реализаций полосовых фильтров предложены способы независимой перестройки параметров АЧХ.

Литература

1. **Богатырев Е.А., Филатов В.А.** Схемотехническое и функциональное моделирование радиоэлектронных устройств в программе Micro-CAP: учебное пособие для вузов. — М.: Издательство МЭИ, 2021.
2. **Гребенко Ю.А.** Однородные устройства обработки сигналов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

*Слайнг К Мьо Лейн, студ.;
рук. А.А. Семкин, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ И НЕКАСКАДНОЙ РЕАЛИЗАЦИЙ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В работе рассмотрены два метода реализации аналоговых активных фильтров высокого порядка: метод каскадной реализации и метод некаскадной реализации на идентичных звеньях. Цель работы — сравнение параметров двух реализаций фильтров: каскадной и некаскадной на идентичных звеньях с межзвенными связями. Некаскадный метод синтеза активных фильтров разработан на кафедре ФОРС НИУ «МЭИ» [1]. Такие фильтры представляют собой последовательное соединение идентичных звеньев первого или второго порядков, охваченных межзвенными обратными связями. При синтезе фильтров низких и высоких частот, полосовых и режекторных фильтров можно выбрать различные типы звеньев. Количество обратных связей при реализации канонической структуры фильтра на идентичных звеньях минимально. Увеличивая количество межзвенных обратных связей, есть возможность улучшить характеристики проектируемого фильтра.

В работе, с помощью программы MICRO-CAP [2], проведен синтез активного низкочастотного фильтра Баттерворта 4-го порядка, с единичным коэффициентом передачи и частотой среза 10 кГц каскадной реализации. С помощью этой же программы произведен расчёт искажений АЧХ из-за изменений значений элементов схемы (наихудший случай, метод Монте-Карло). Проведена оценка нелинейных искажений такого фильтра. Предложены способы перестройки частоты среза ФНЧ.

По методике, изложенной в [1], проведен расчёт некаскадного фильтра на идентичных звеньях с параметрами аналогичными каскадной реализации. Сделан выбор звеньев, рассчитаны значения пассивных элементов, проведен расчёт элементов обратных связей. С помощью программы MICRO-CAP проанализирована чувствительность параметров АЧХ к обратным связям. Показаны пути снижения искажений АЧХ, вызванные отклонением значений обратных связей. Проведен расчёт искажений АЧХ из-за изменений значений всех пассивных элементов схемы (наихудший случай, метод Монте-Карло). Предложены способы перестройки частоты среза ФНЧ.

Литература

1. **Гребенко, Ю.А.** Однородные устройства обработки сигналов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. **Богатырев, Е.А.** Схемотехническое и функциональное моделирование радиоэлектронных устройств в программе Micro-CAP / Богатырев Е.А., Филатов В.А. — М.: Издательство МЭИ, 2021.

К.В. Воронцов, асп.; рук. Д.А. Фролов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)»

РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС ИНТЕРФЕЙСА JESD204B ДЛЯ ВЫСОКОСКОРСТНОГО ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ МЕЖДУ ЦАП И АЦП

В многоканальных приёмо-передающих устройствах с высокой скоростью оцифровки требуется согласованная работа десятков и сотен каналов, поэтому критичным узлом становится тракт «АЦП/ЦАП — ПЛИС». Применение стандарта JESD204B позволяет перейти от широких параллельных шин с логическими уровнями LVTTTL/CMOS к высокоскоростной дифференциальной последовательной передаче, уменьшая число выводов микросхем и количество линий разводки на плате, что снижает сложность компоновки и требования к трассировке.

Цель работы — построение и проверка в ПЛИС интерфейса JESD204B для обмена данными с ЦАП/АЦП с заданными параметрами числа линий L , скорости линии R и формата кадров (параметры F , K). Для оценки достижимой пропускной способности используется соотношение $D = LR\eta$, где η — эффективность кодирования, для варианта 8b/10b $\eta = 0,8$. В работе акцент сделан на функциях канального уровня и поддержке выравнивания линий (синхронизация, контроль целостности потока и диагностирование ошибок), тогда как физический уровень реализуется встроенными высокоскоростными приёмопередатчиками ПЛИС. В качестве аппаратной платформы используется плата AXKU5P на базе ПЛИС Kintex UltraScale+ XCKU5P.

Верификация решения строится по схеме из двух шагов. На первом шаге применяется готовое ядро JESD204 как эталон поведения и источник тестовых режимов. На втором шаге выполняется замена максимально возможной части функциональности собственными модулями регистрово-тактового уровня с сопоставлением результатов с эталонной реализацией. Для отладки и управления предусмотрено использование встроенного процессорного ядра Microblaze. Контроль корректности передачи планируется проводить в режимах петли и обмена с преобразователями данных с оценкой показателей: устойчивость захвата синхронизации, доля ошибок (по тестовым последовательностям), задержка и её разброс между линиями, а также аппаратные затраты (использование логических ресурсов и приёмопередатчиков).

Литература

1. AMD. Руководство по модулю JESD204 версии 7.2 (PG066): руководство по продукту. 04.10.2017. Электронный ресурс. URL: https://www.amd.com/content/dam/xilinx/support/documents/ip_documentation/jesd204/v7_2/pg066-jesd204.pdf (дата обращения: 01.12.2025).

М.А. Портнов, студ.; рук. В.А. Филатов, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ БПЛА FPV ТИПА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

С каждым днем производство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) наращивает свои мощности. Их варианты с видеосигналом «от первого лица» (англ. First Person View, FPV) способны обходить самые передовые системы радиоэлектронной борьбы и наиболее актуальны в настоящее время. Большинство БПЛА такого типа используют сигналы с расширением спектра по методу псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) для помехоустойчивой передачи информации [1].

В докладе рассматривается разработка алгоритма для обнаружения сигналов БПЛА в диапазоне частот от 700 МГц до 6 ГГц, который выполняется на микроконтроллере ATSAMG55J19 32 бит с ядром ARM Cortex M4.

Программное обеспечение для работы микроконтроллера ATSAMG55J19 разработано в среде Atmel Studio на языке C. Алгоритм обнаружения включает в себя сканирование частотного диапазона и анализ спектральных составляющих. Для быстрого обнаружения радиосигналов в эфире проводится сканирование спектра радиочастот в полосе 10 МГц. Для более точного детектирования полоса сканирования уменьшается до 1 МГц. На основе дальнейшего анализа определяется диапазон, в котором происходит перестройка частотных составляющих ППРЧ, и оценивается их уровень мощности. После определения параметров, каждый сигнал классифицируется по степени угрозы.

Отладка алгоритма выполнена на экспериментальном макете платы, обеспечивающей необходимую функциональность.

Предложенный алгоритм может быть использован при разработке устройств для радиоэлектронной борьбы, где требуется противодействие БПЛА.

Литература

1. **Борисов, В.И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И., Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, под. ред. В.И. Борисова // — М.: РадиоСофт, 2008. — 512 с. — ISBN 978-5-93274-014-9.

Секция 4
АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН
Antennas and propagation

Председатель секции: к.т.н. Михайлов Михаил Сергеевич

Секретарь секции: Михайлов Алексей Михайлович

*Н.С. Максимов, соиск.;
рук. А.Р. Сафин, д. физ.-мат.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ НА ВОЛНОВОДЕ ИЗ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

Возмущение ориентации локальных магнитных моментов может распространяться в магнитном материале в виде волны. Эта волна была впервые предсказана Блохом в 1929 году и получила название спиновой волны, поскольку связана с коллективным возбуждением системы спинов электронов в ферромагнитных материалах [1].

Спиновые волны исследуются экспериментально [2]. Характеристики можно целенаправленно формировать с помощью широкого спектра параметров, включая выбор магнитного материала, геометрию образца, а также ориентацию и величину приложенного подмагничивающего поля [3].

Классический пример такого материала — железо-иттриевый гранат ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, ЖИГ), который часто применяется в технике СВЧ благодаря низкому затуханию на высоких частотах. Потери в структурах типа линий задержки (ЛЗ) выполненных на ЖИГ с щелевыми антеннами варьируются от 10 до 20 дБ при толщине пленки 60 мкм и длине 4 мм [4] это обусловлено краевыми эффектами, неоднородностями и модовым рассеянием.

Уменьшить потери в ЛЗ на ЖИГ с 20 дБ до 10 дБ при толщине пленки 10 мкм и расстоянии между антеннами 9 мм можно при помощи заземленного экрана под пленкой. Металлические экраны влияют на дисперсию спиновых волн через дипольное магнитное поле, выходящее за пределы пленки. В случае поверхностных спиновых волн распределение магнитостатического потенциала по толщине пленки описывается гиперболическими функциями и его максимум находится на поверхности пленки. Поэтому в разработанной линии задержки в качестве „рабочих“ были выбраны поверхностные спиновые волны.

Литература

1. Bloch F. 1930 Z. Phys. 61 206.
2. Гепус С.В., Локк Э.Г. Экспериментальные методы исследования спиновых волн // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 5. С. 520–533. DOI: 10.18500/0869-6632-003002. EDN: ZYFAEY.
3. Gurevich A.G. and Melkov G.A. 1996 Magnetization Oscillations and Waves (New York: CRC Press).
4. Етко Ю.Л., Устинов А.Б. Широкополосные спин-волновые линии задержки со щелевыми антеннами // Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37, вып. 21. С. 5–9.

*Ю.В. Редкозуб, Г.В. Охрицкий, студенты; К.В. Смусева, асп.;
рук. Г.К. Усков, д.ф.-м.н., проф. (ВГУ, Воронеж)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПАТЧ АНТЕНН МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ МОД

Взаимное влияние элементов в ММО антенных решётках приводит к искажению диаграмм направленности, изменению входных параметров и росту корреляции каналов. В работах [1, 2] на основе теории характеристических мод сформированы энергетические критерии оценки взаимной связи в многопортовых структурах, позволяющие выделять моды, ответственные за рост взаимной связи и ухудшение развязки. Вместе с тем количественный критерий расстояния, при котором соседние элементы могут рассматриваться как электродинамически независимые, остаётся недостаточно определённым.

В докладе рассматривается подход к определению «границы взаимного влияния» по частотным зависимостям модальной значимости. Сначала рассчитываются первые четыре характеристические моды одиночной двухполяризационной патч-антенны по обеим поляризациям. Затем анализируется система из двух идентичных элементов и при параметрическом изменении межэлементного расстояния вычисляются модальные значимости тех же мод. Граница взаимного влияния определяется как такое расстояние, при котором частотная зависимость модальной значимости для пары совпадает с одиночным случаем в заданном допуске, а последующее увеличение шага не приводит к их изменению.

Предлагаемый критерий позволяет обосновывать минимальный шаг при синтезе антенных решёток, исключая необходимость отдельной многопортовой оптимизационной задачи. Методика может быть распространена на конечные решётки с большим числом элементов и использоваться как самостоятельно, так и совместно с традиционными методами анализа взаимной связи.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Литература

1. Su W., Zhang Q., Alkaraki S., Zhang Y., Zhang X.-Y., Gao Y. Radiation Energy and Mutual Coupling Evaluation for Multimode MIMO Antenna Based on the Theory of Characteristic Mode // IEEE Trans. Antennas Propag. 2019. Vol. 67. No. 1. P. 74–84.
2. Su W., Zhang Q., Gao Y. A Novel Method to Interpret the Mutual Coupling Based on Characteristic Mode Theory // Proc. 13th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow, Poland, 2019. P. 1–5.

К.С. Сычев, К.С. Харлампьев, И.А. Громов, асп.;
рук. М.С. Михайлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ НА РТХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ СТРУКТУР, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Использование аддитивных технологий при изготовлении радиопрозрачных конструкций позволяет добиться улучшенных радиотехнических характеристик с применением материалов, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью. Такие улучшения достигаются путем изменения величины заполнения материала в конструкции. При этом размеры элемента заполнения должны быть минимальны по сравнению с рабочей длиной волны. Также форма заполнения оказывает влияние на радиотехнические характеристики радиопрозрачных конструкций за счет формирования слоев с неоднородной эффективной диэлектрической проницаемостью.

Целью данной работы является оценка влияния размеров и формы элемента заполнения на радиотехнические характеристики радиопрозрачных структур, изготовленных с использованием аддитивных технологий. В ходе работы проведены: электродинамический расчет диэлектрических характеристик плоских пластин с различными размерами и формами заполнения при различных углах падения электромагнитной волны, сравнение полученных дисперсионных характеристик с математически полученным значением диэлектрической проницаемости с помощью формул смешения.

Дополнительно проведены расчеты радиотехнических характеристик антенной системы, укрытой радиопрозрачной конструкцией с различным заполнением. Проведено сравнение результатов с расчетом материалов без использования аддитивных технологий. По окончании работы сделаны выводы о влиянии размеров и формы элемента заполнения на радиотехнические характеристики радиопрозрачных структур, представлены варианты формы заполнения для некоторых вариантов радиопрозрачных обтекателей и методика их построения.

Литература

1. **Балашов, А.Ю.** Применение 3D-печати при разработке конструкций, обладающих радиопрозрачными свойствами / А.Ю. Балашов, Н.Х. Гюльмагомедов, А.С. Ермилов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : Материалы VII Международной конференции, Москва, 07–08 октября 2021 года. — Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2021. — С. 180–189. — EDN COSCVL

*К.С. Харлампьев, К.С. Сычев, И.А. Громов, асп.;
рук. М.С. Михайлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУГЛЫХ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Управление величиной диэлектрической проницаемости является достоинством аддитивных технологий при изготовлении радиопрозрачных конструкций, антенн и устройств СВЧ. Изменение диэлектрической проницаемости достигается за счет изменения заполнения материала. Для уменьшения диэлектрической проницаемости в качестве дополнительного материала используется воздух, для увеличения — материал с большей диэлектрической проницаемостью, чем основа.

Целью данной работы является проведение измерений диэлектрических характеристик круглых образцов с различным заполнением при помощи объемного резонатора. В качестве материала основы выбран пластик PLA. В ходе работы проведены: теоретические и экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости при различных величинах заполнения.

Проведен анализ влияния внешней оболочки образцов на диэлектрические характеристики и сравнение с теоретическими результатами. Представлены измерения пластиков с различными красителями. Результаты измерений приближено совпадают с результатами теоретического расчета и электродинамического моделирования. По окончании работы сделаны выводы о точности некоторых формул смещения для использования в разработке радиопрозрачных конструкций с использованием аддитивных технологий. Также предложены варианты использования в антеннах и СВЧ-технике.

Литература

1. **А.Ю. Балашов.** Применение 3D-печати при разработке конструкций, обладающих радиопрозрачными свойствами / А.Ю. Балашов, Н.Х. Гюльмагомедов, А.С. Ермилов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : Материалы VII Международной конференции, Москва, 07–08 октября 2021 года. — Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2021. — С. 180–189. — EDN COSCVL
2. **Н.Х. Гюльмагомедов.** Экспериментальное исследование диэлектрических характеристик криволинейных образцов материалов / Н.Х. Гюльмагомедов, Д.А. Евсеев, И.А. Громов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. — 2022. — № 1. — DOI 10.30898/1684-1719.2022.1.2. — EDN JH0OKT

*К.С. Харлампов, К.С. Сычев, И.А. Громов, асп.;
рук. М.С. Михайлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА РАДИОПРОЗРАЧНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие аддитивных технологий позволяет повысить точность и скорость изготовления радиопрозрачных конструкций. В предыдущих исследованиях была показана возможность управления диэлектрической проницаемостью путем изменения коэффициента заполнения филаментов при 3D-печати.

Несмотря на важность радиотехнических характеристик обтекателя для работы радиотехнической системы, механические и тепловые свойства, как правило, находятся в центре внимания при разработке обтекателя. Данный метод приводит к искажению диаграммы направленности и угловой погрешности, а также к увеличению уровня боковых лепестков.

Целью исследования является исследование конструкции радиопрозрачного обтекателя с учетом заданной толщины, необходимой для сохранения работоспособности обтекателя при воздействии внешних сил.

В ходе исследования были получены результаты измерений диэлектрических характеристик при различных значениях заполнения и использовании различных типов филаментов. Было проведено электродинамическое моделирование полученной конструкции для определения ее радиотехнических характеристик и влияния на параметры антенных систем. Также проведено сравнение с неоптимальной конструкцией по радиотехническим параметрам. Кроме того, представлен анализ влияния размера и формы элемента заполнения.

На основании результатов, полученных в ходе данного исследования, представлены формы элементов заполнения для основных типов радиопрозрачных обтекателей. Представлена методика их разработки с учетом размера элемента заполнения для использования в дальнейших разработках.

Литература

1. **Gruner, G.**, Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids, Springer, Berlin, 1998.
2. **Lichtenecker, K. and K. Rother**, “Die Herleitung des logarithmischen Mischungs-gesetzes aus allegemeinen Prinzipien der stationaren Stromung,” Phys. Zeitschr., Vol. XXXII, 255–260, 1931.
3. **Ermilov, A.S., A.Yu Balasov, N.Kh. Gyulmagomedov, and D.A. Evseev**, “Application of 3D printing in rocket technology products,” XLVII Academic Reading on Cosmonautics, 276–285, 2023.

В.Д. Лозенко, студ.; рук. Н.С. Максимов, асс. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ГИРОТРОПНЫХ СРЕД В САПР

Ферритовые устройства диапазона СВЧ (изоляторы, циркуляторы, фазовращатели) основаны на использовании гиротропных материалов с тензорной магнитной проницаемостью [1]. Для оптимального выбора параметров и геометрии таких устройств необходим электромагнитный расчёт с учётом анизотропии среды, что делает актуальной проверку методики моделирования гиротропных сред в САПР.

В работе рассматривается постановка задачи расчёта распространения СВЧ волн в гиротропной среде. Показано как задаются компоненты тензора магнитной проницаемости, связанные с полем подмагничивания, намагниченностью насыщения и параметрами затухания [2] в магнитном резонаторе. Описываются параметры гиротропного материала [3] для применения как волноводных, так и микрополосковых устройствах с ферритовыми вставками.

В работе приводится расчёт микрополоскового ферритового циркулятора, а также сравнение численных результатов с аналитическими оценками для проверки корректности выбранной модели гиротропной среды.

Литература

1. **Сазонов Д.М.** Антенны и устройства СВЧ. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.
2. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982.
3. **CST STUDIO SUITE® 2018** — High Frequency Simulation. User Manual. — Dassault Systèmes, 2018.

*К.Н. Калинина, студ.;
рук. Н.С. Максимов, ассистент. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ РЛС С АФАР В САПР SYSTEMVUE

Радиолокационные станции с активной фазированной антенной решёткой (АФАР) широко применяются в системах обнаружения и сопровождения [1]. Увеличение числа излучающих элементов и требований к диаграмме направленности делает актуальным использование средств автоматизированного проектирования для моделирования антенной решётки и системного моделирования РЛС в среде SystemVue [2]. Это позволяет учитывать реальные характеристики АФАР, а не ограничиваться упрощёнными моделями.

В работе рассматривается подход к моделированию РЛС с АФАР на основе эквидистантной антенной решётки из 6600 элементов ($N=66$, $M=100$) с межэлементным шагом 0,6λ, размерами полотна 6×4 м ($S=24 \text{ м}^2$) и коэффициентом усиления 45 дБ. На основе трёхмерной модели решётки рассчитывается диаграмма направленности и формируется модель РЛС, включающая передающий и приёмный тракты, радиоканал и цель. Для обеспечения максимальной дальности обнаружения $R_{\max}=1200 \text{ км}$ при ЭПР цели $\sigma=1 \text{ м}^2$ задаются параметры: импульсная мощность передатчика ($P_{\text{и}}=96 \text{ кВт}$), средняя мощность ($P_{\text{ср}}=6 \text{ кВт}$), мощность на один излучатель 14,5 Вт, период повторения ($T_{\text{п}}=8 \text{ мс}$), длительность импульса ($\tau_{\text{и}}=500 \text{ мкс}$), скважность ($Q=16$).

Использование САПР совместно с моделью АФАР позволяет уже на этапе проектирования анализировать влияние числа элементов, шага, геометрии и характеристик излучателей на диаграмму направленности и достижимую дальность обнаружения. Это даёт возможность обоснованно выбирать структуру АФАР под конкретные задачи, снижать объём избыточного макетирования при переходе к аппаратной реализации и использовать полученную модель как в инженерных расчётах, так и в учебном процессе.

Литература

1. Сколник М. Введение в технику радиолокационных систем. М.: Мир, 1966.
2. Keysight Technologies. SystemVue [Электронный ресурс]. URL: <https://amerit.nnov.ru/upload/iblock/842/94m2qu5qhfhxqpr21t8263uwnadzeblv.pdf>

*П.В. Тишакова, студ.; К.В. Смусева, асп.;
рук. Г.К. Усков, д.ф.-м.н., проф. (ВГУ, Воронеж)*

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ РАДИОГОЛОГРАММЫ ДЛЯ ПЕЧАТНОЙ АНТЕННЫ КУ-ДИАПАЗОНА

Радиоголографические антенны рассматриваются как альтернатива рефлекторным и активным ФАР в системах спутниковой связи Ку-диапазона [1]. В известных работах внимание уделяется главным образом синтезу распределения амплитуды, тогда как влияние дискретизации воспроизведения радиоголограммы на диаграмму направленности и уровень боковых лепестков изучено неполно [2].

В работе проведено численное моделирование голографической антенны Ку-диапазона, в котором под шагом дискретизации понимается расстояние между узлами сетки при экспорте радиоголограммы (2, 3, 4 и 5 мм), а под максимальным размером металлического элемента — длина стороны квадрата, вписанного в ячейку (от половины до полного шага, то есть в зависимости от шага сетки от 1 до 5 мм). Получены значения направления главного лепестка, коэффициента усиления и уровня боковых лепестков при различных шагах дискретизации и размерах квадратов.

Показано, что при шаге дискретизации 2 мм оптимальной является конфигурация с максимальным размером металлического элемента около 1,8 мм, обеспечивающая усиление до 16 дБи и снижение боковых лепестков ниже –8 дБи. При увеличении шага дискретизации до 3 мм оптимальный размер самой крупной ячейки составляет 2,7 мм, но характеристики заметно ухудшаются, а при шагах 4–5 мм не удаётся одновременно обеспечить требуемое положение главного лепестка, высокий коэффициент усиления и подавление боковых лепестков из-за недостаточной пространственной детализации радиоголограммы.

Полученные результаты могут использоваться в качестве рекомендаций при выборе шага сетки и размеров металлических ячеек при проектировании печатных голографических антенн для спутниковых и бортовых систем связи.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Литература

1. **Rusch C.** Holographic Antennas // Handbook of Antenna Technologies. Singapore: Springer Science + Business Media, 2015.
2. **Kumar R., Gautam S.K., Kumar A., Arya R.K., Ali M., Singh P.P.** High Gain Holographic Antenna Using Microstrip Aperture Feed // 2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). Ahmedabad, India, 2023. P. 1–4.

Д.А. Тетушкин, студ.; рук. Ю.В. Каракулин, к.т.н., доц.,
В.Б. Сучков, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва),
Г.М. Серегин, к.т.н., доц. (МФТИ, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА ОТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию № FSN-2025-0014

В работе представлена методика определения диаграммы направленности сверхширокополосной логарифмической четырехзаходной спиральной антенны в режиме приема в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц. Большим преимуществом спиральных антенн, помимо их сверхширокополосности, является зависимость формы диаграммы направленности (воронкообразная или игольчатая) от способа питания плеч антенны, что позволяет реализовать суммарно-разностную обработку за счет соответствующих схем питания. В рамках работы представлен алгоритм определения диаграммы направленности антенны на прием, представлены результаты численного моделирования, приведено сравнение полученных результатов с теоретическими.

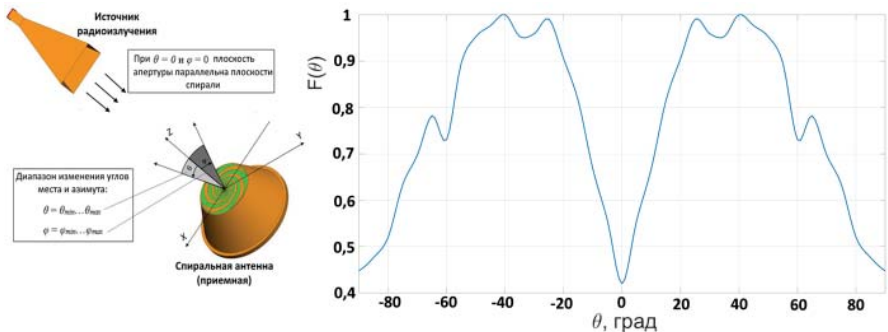


Рис. 1. Взаимное расположение передающей и приемной антенн, результат моделирования диаграммы направленности на прием на частоте 3 ГГц

Разработанный алгоритм позволяет получить диаграмму направленности спиральной антенны бортового радиопеленгатора в широкой полосе частот в режиме приема.

Литература

1. Исследование частотных характеристик сверхширокополосной спиральной антенны / А.Б. Борзов, К.П. Лихоеденко, В.Б. Сучков [и др.] // Антенны и распространение радиоволн: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 18–21 октября 2023 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2023. — С. 37–40. — EDN HZODXM

*В.С. Моргачева, студ.; Е.П. Свистовцев, студ.;
рук. Г.К. Усков, д.ф.-м.н., проф. (ВГУ, Воронеж)*

СИНТЕЗ СИНФАЗНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ 2×4 НА ЭЛЕМЕНТАХ «BOW-TIE»

По результатам электродинамического моделирования синфазной антенной решётки 2×4 на элементах типа «bow-tie» [1, 2], выполненного в CST Studio Suite 2025, была разработана компактная антенная система для диапазона 1150–1300 МГц. Моделирование показало, что ширина диаграммы направленности составляет порядка 26° в Е-плоскости и 97° в Н-плоскости, что соответствует требованиям к сектору покрытия при синфазном возбуждении массива.

Уровни боковых лепестков достигают –12.4 дБ (Е-плоскость) и –14.1 дБ (Н-плоскость), что позволяет использовать решётку в системах с контролируемой ДН. КУ решётки находится в пределах 11.1–11.3 дБи, что создаёт запас для дальнейшего увеличения КУ при оптимизации распределения амплитуд и межэлементных расстояний.

Габариты конструкции, полученные на этапе моделирования, составляют 368×120×60 мм, что подтверждает возможность реализации компактной антенной системы для заданного частотного диапазона. При последующей оптимизации геометрии, взаимного расположения элементов и отражателя ожидается укладывание конструкции [3] в требуемые габаритные ограничения без ухудшения радиотехнических характеристик.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

В работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО «ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Литература

1. **Lin Yu-De, Tsai Syh-Nan** Coplanar waveguide-fed uniplanar bow-tie antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1997. Vol. 45, no. 2. P. 305–306.
2. **Compton R.C., McPhedran R.C., Popovic Z., Rebeiz G.M., Tong P.P., Rutledge D.B.** Bow-tie antennas on a dielectric half-space: Theory and experiment // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1987. Vol. 35, no. 2. P. 622–631.
3. **Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.** Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с. ISBN 5-88070-086-0.

*С.А. Степанов, асп.; Д.Е. Губарев, асп.;
рук. В.А. Борисов, к.т.н., с.н.с.
(АО «Российские Космические Системы», Москва)*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА НА ВСТРЕЧНЫХ СТЕРЖНЯХ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАКТА МЕТОДОМ ПОЛНОВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящее время полосовые фильтры находят широкое применение в приемно-усилительном тракте бортовой космической аппаратуры. От эффективности фильтрации зависит уровень нелинейных искажений. Однако большинство опубликованных работ ограничиваются схемотехническим анализом, не учитывая электромагнитную совместимость, которая играет важную роль при работе фильтра в условиях плотной компоновки устройства.

Целью работы является проектирование и исследование микрополоскового фильтра на встречных стержнях с использованием современного подхода полного волнового моделирования. Особое внимание уделяется определению влияния конструкции на электромагнитные характеристики и S-параметры фильтра. Работа направлена на формирование методики снижения нелинейных искажений, возникающих в приемно-усилительном тракте. Новизна работы заключается в комплексном анализе фильтра с позиции учета паразитных электромагнитных эффектов, возникающих в составе компактного приемного устройства.

В ходе работы сравнивались результаты схемотехнического проектирования с анализом в CST Studio Suite, которые верифицированы экспериментом. Сделаны выводы о влиянии конструктивных решений на характеристики фильтра и, как следствие, на приемно-усилительный тракт. Практическое значение работы состоит в применении методики проектирования полосовых фильтров в приемно-усилительных трактах космической аппаратуры с использованием полного волнового моделирования для выявления и минимизации паразитных эффектов, что приводит к повышению степени электромагнитной совместимости и улучшению динамического диапазона приемника.

Литература

1. **Губарев, Д.Е.** Фильтр на встречных стержнях. Сборник статей МНПК. — Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. — С. 21–28.
2. **Степанов С.А.** Анализ и моделирование приемно-усилительного тракта с использованием CST Studio Suite. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12. № 3. С. 1–9.

Н.Ю. Лебедев, студ.; рук. И.В. Сисигин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННОГО СВЧ КОММУТАТОРА

Одним из важных этапов разработки радиоэлектронных устройств являются испытания, в ходе которых выявляются ошибки, допущенные при проектировании, сборке, программировании. Практика измерения и анализа параметров устройств применяется в индивидуальных работах, проектах, заказах в целях выявления недостатков и необходимости в повышении качественных характеристик изделия.

В Научном центре радиолокационных систем НИУ «МЭИ» был разработан антенный коммутатор (АК) СВЧ сигналов, который будет функционировать совместно с двухканальным пеленгатором на базе модуля исследования радиотехнических систем «МИРТС», разработанного в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова.

В настоящее время для исследований изготовлено несколько экземпляров (АК). Сборка СВЧ устройств такого уровня требует высокой квалификации инженерного состава, а проверка работоспособности и соответствия заявленным параметрам специального оборудования и методики проверки.

В связи с этим, мною было разработано оригинальное Методическое пособие для измерения основных технических параметров и характеристик СВЧ устройств данного типа, которое помогает не только оценить корректность функционирования устройства, но и выявить причину неполадки, при её наличии.

Методическое пособие прошло апробацию при оценке работоспособности АК. При этом были выявлены недостатки, устранение которых, привело к получению заданных технических параметров и характеристик.

Литература

1. **Диденко В.И.** Основы метрологии. В 2 Часть 1 М.: Издательство МЭИ, 2019.
2. **Анучин А.С.** Написание и оформление научных публикаций. М.: Издательский дом МЭИ, 2022.
3. **Хоровиц П.** Искусство схемотехники: В 3-х Томах: Т. 1. Пер. С англ. — 4-е изд. перераб. и доп. — М.: Мир, 1993. — 413 с., ил. ISBN 5-03-002337-2.

*В.П. Левченко, асп., рук. В.А. Борисов, к.т.н., с.н.с.
(АО «Российские Космические Системы», Москва)*

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРОВ СВЧ ФИЛЬТРА ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА

В настоящее время бортовая аппаратура ретрансляторов высокой мощности находит широкое применение для обеспечения надежной связи в любой точке Земли. От надежности элементов радиотракта будет зависеть срок активного существования всего космического аппарата. При этом в составных частях радиотракта, функционирующих с высокой ВЧ мощностью, может возникать мультипакторный разряд, который способен сократить срок службы этих элементов тракта или привести их в негодность.

Целью работы является определение резистентной к мультипакторному разряду геометрии внутри фильтра L-диапазона и поиск ее оптимальных параметров путем моделирования в ПО CST Studio Suite.

В ходе работы были обнаружены и проанализированы области, являющимися слабым местом конструкции фильтра с точки зрения возникновения мультипакторного разряда. Были предложены решения, основанные на изменении геометрии резонаторов фильтра с целью снизить вероятность возникновения мультипакторного разряда и повысить порог максимальной ВЧ мощности, при которой этот разряд не будет возникать. Обнаружен способ повысить порог возникновения мультипакторного разряда путем изменения конструкции резонаторов, что показано моделированием в CST Studio Suite, что может в будущем при разработке устройств, свободных от возникновения от мультипакторного разряда при номинальных мощностях.

Литература

1. **F. Höhn; W. Jacob; R. Beckmann; R. Wilhelm.** The transition of a multipactor to a low-pressure gas discharge, *Phys. Plasmas* 4, 940–944 (1997) DOI: 10.1063/1.872564.
2. **A.S. Sakharov, V.A. Ivanova, and M.E. Konyzhev,** Particle-in-Cell Simulation of Multipactor Discharge on a Dielectric in a Parallel-Plate Waveguide.
3. Space engineering Multipactor handbook // ECSS Secretariat ESA-STECC // [Электронный ресурс] URL: [https://ecss.nl/wp-content/uploads/2020/07/ECSS-E-HB-20-01A\(15\)June2020\).pdf](https://ecss.nl/wp-content/uploads/2020/07/ECSS-E-HB-20-01A(15)June2020).pdf) (дата обращения: 06.12.2025).

*А.М. Михайлов, Н.И. Кирюшин, Н.А. Павлов, студенты;
рук. М.С. Михайлов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ С ПОМОЩЬЮ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Нейросети активно применяют для решения различных задач [1], однако напрямую использовать результаты других для прогнозирования работы антенной системы, не получается, поэтому в работе рассматривается применение свёрточных нейронных сетей (CNN) для быстрой и точной оценки коэффициента усиления антенных решёток различных конфигураций. Классические методы вычисления диаграмм направленности, основанные на численных электродинамических подходах (FDTD, FEM, MoM), обеспечивают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и времени моделирования. Использование CNN позволяет заменить дорогостоящие электродинамические расчёты обученной моделью, способной предсказывать усиление и форму диаграммы направленности на основании параметров решётки в режиме реального времени.

Предлагаемый подход включает формирование набора данных из результатов электромагнитного моделирования. На выходе CNN прогнозирует коэффициент усиления в заданном направлении. Использование свёрточных слоёв позволяет эффективно извлекать пространственные закономерности, связанные с взаимным влиянием элементов и интерференционными эффектами.

Литература

1. **S. Lloyd, R.A. Irani and M. Ahmadi**, “Using Neural Networks for Fast Numerical Integration and Optimization,” // IEEE Access, vol. 8, pp. 84519–84531, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991966

*А.М. Михайлов, Н.И. Кирюшин, Н.А. Павлов, студенты;
рук. М.С. Михайлов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ НАЛИЧИИ ТРОПОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА

Распространение радиоволн в приморских условиях осложняется влиянием морской поверхности и атмосферных неоднородностей, в частности, тропосферных волноводов. Эти эффекты приводят к аномальному затуханию или усилению сигнала, что необходимо учитывать при проектировании морских радиосистем. В [1] морская поверхность рассматривается как отражающая граница с переменными электрофизическими параметрами, что влияет на формирование интерференционной картины и возникновение волноводных мод в приземном слое тропосферы.

Для анализа распространения радиоволн в сложных условиях в [1] предложено использовать метод параболического уравнения (ПУ), позволяющий эффективно моделировать волновые процессы в неоднородных средах с учётом рефракции, дифракции и отражений. При наличии температурных и влажностных инверсий в тропосфере может формироваться волноводный канал, способствующий дальнейшему распространению УКВ-радиоволн с малыми потерями. Метод ПУ позволяет детально моделировать такие условия и прогнозировать зоны усиления/ослабления сигнала.

Литература

1. **V.A. Permyakov, M.S. Mikhailov, E.S. Malevich**, "Analysis of propagation of electromagnetic waves in difficult conditions by the parabolic equation method," // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019.

Секция 6
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
Optoelectronic instrumentation

Председатель секции: к.т.н., доцент Поройков Антон Юрьевич

Секретарь секции: Еремин Данил Владимирович

*Н.В. Солдатов, студ.;
рук. П.Г. Зверев, д.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНОМ КРИСТАЛЛЕ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ, ПО ЗАТУХАНИЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Фторидные материалы обладают широкой областью прозрачности фторидов от ближнего ультрафиолетового до далекого инфракрасного диапазона. Они являются основой многих оптических и лазерных приборов, работающих в широком спектральном интервале длин волн. Активные элементы из кристаллов фторидов, активированных ионами Yb^{3+} , позволяют получать лазерное излучение на длине волны в области 1030 нм при возбуждении полупроводниковыми лазерными диодами с длиной волны 975 нм [1]. Кубическая структура CaF_2 позволяет их использовать для создания лазерной керамики на их основе [2].

В ионах иттербия отсутствуют процессы концентрационного тушения, что позволяет использовать оптически плотные лазерные кристаллы с высокой концентрацией примесных ионов Yb^{3+} вплоть до десятков атомных процентов. Сильное поглощение в таких кристаллах ограничивает точность измерения их коэффициента поглощения. В настоящей работе предложено измерять пропускание в оптически плотных кристаллах по регистрации люминесценции с боковой поверхности.

В эксперименте использовался кристалл CaF_2 , активированный ионами с концентрацией 5 ат.%. Для возбуждения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 956 нм. Регистрация люминесценции проводилась видеокамерой CCD Sanyo VSB-3572 IRP с объективом, располагающейся сбоку от кристалла. Использовалась специальная программа, с помощью которой можно было наблюдать свечение в исследуемом образце, оцифровать изображение и определить уровень свечения.

Автором были зарегистрированы зависимости люминесценции от интенсивности возбуждающего лазера, которые позволили определить коэффициент поглощения в исследованном кристалле $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$, равным $3,35 \text{ см}^{-1}$, что согласуется со значением, полученным методом абсорбционной спектроскопии на тонком образце.

Литература

1. **Siebold, M.** et al. Yb: CaF_2 — a new old laser crystal // Applied Physics B. 2009. V. 97. № 2. P. 327.
2. **Liu Z.** et al. Microstructure and laser emission of Yb: CaF_2 transparent ceramics fabricated by air pre-sintering and hot isostatic pressing // Optical Materials. 2022. V. 129. P. 112540.

Е.С. Иванов, студ.; рук. В.С. Фланден, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПИРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН

В пирометрах для измерения температуры лопаток турбин в качестве фотодетекторов обычно используются кремниевые PIN-фотодиоды (ФД). Инструментальная погрешность пирометров $\pm 0,5 \dots 1,0\%$. Они оптимальны при высоких температурах лопаток в диапазоне от 700 до 1200 °C [1].

Однако, в некоторых случаях требуется проводить измерения при температуре лопаток от 500 до 700 °C, когда их интенсивность излучения гораздо ниже. При этом кремниевые ФД генерируют существенно меньший фототок. В результате ухудшается соотношение сигнал/шум и возрастает инструментальная погрешность измерения температуры лопаток.

Чтобы её снизить, проведены расчётные и экспериментальные исследования для оценки возможности применения фотодетекторов на основе кремниевых лавинных ФД (ЛФД), InGaAs-ЛФД и InGaAs-PIN-ФД. Последние из них имеют максимальную чувствительность в более длинноволновой области спектра, чем 0,5–1,1 мкм для кремниевых ФД. А именно в диапазонах 1,5–1,7 мкм и 2,1–2,3 мкм, свободных от излучения продуктов сгорания. Они состоят в основном из газообразных H_2O и CO_2 , имеют температуру до 1700 °C и создают помеху для пирометра.

Были выбраны модели указанных типов ФД и ЛФД и соответствующие им модели операционных усилителей, на выходе которых были рассчитаны сигнал и шум напряжения в зависимости от температуры лопатки в 3-х спектральных диапазонах. Аналогичные зависимости сигнала пирометра от температуры были сняты экспериментально на модели АЧТ.

Указанные спектральные диапазоны находятся в области Вина, где с увеличением длины волны возрастает спектральная плотность излучения лопаток и соответственно фототок, генерируемый фотодетектором. Кроме того, использование ЛФД вместо ФД приводит к снижению шума в сигнале пирометра. В результате на низкотемпературных режимах улучшается соотношение сигнал/шум и снижается инструментальная погрешность пирометра.

Применение метода спектрального отношения интенсивностей излучения в различных спектральных диапазонах позволяет снизить методическую погрешность за счёт исключения влияния неопределённости коэффициента излучательной способности лопаток на результат измерений.

Литература

1. **Поскачей А.А., Пашов Б.М., Ганзбург М.Ф.** Контроль температуры рабочих лопаток газотурбинного двигателя // Наука и технологии в промышленности. 2001–2002. № 4-1. С. 22–27.

С.К. Балашова, студ.; рук. А.С. Акентьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ БОРТОВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕДАТЧИКА

Волоконные лазерные передатчики являются ключевыми компонентами современных бортовых систем оптической связи, обеспечивающих высокоскоростную передачу данных. Широкое внедрение этой технологии на космические аппараты сдерживается необходимостью гарантировать стабильность работы в условиях огромного количества дестабилизирующих факторов. Помимо внутренних ограничений, связанных с конструкцией лазера и схемы накачки, на параметры передатчика критически влияют внешние факторы, характерные для бортового применения. К наиболее значимым из них относится радиация, вызывающая деградацию элементов, а также экстремальные температурные перепады, приводящие к изменению длины волны генерации и пороговых характеристик. Совместное воздействие этих факторов может привести к необратимому ухудшению ключевых характеристик, снижению энергоэффективности, надёжности и, как следствие, к сокращению расчётного срока работы аппарата [1, 2].

В работе автором был выполнен анализ и систематизация основных факторов, воздействующих на волоконные лазерные передатчики в условиях эксплуатации на борту космических средств. Были рассмотрены принципы работы и конструктивные особенности таких передатчиков, выявлены и классифицированы внешние и внутренние факторы. Проанализировано их влияние на основные выходные параметры устройств, такие как длина волны, мощность, эффективность и срок службы.

В результате работы определены ключевые внешние и внутренние факторы, влияющие на параметры бортового волоконного лазерного передатчика. Разработаны рекомендации для повышения устойчивости и надёжности устройств в экстремальных условиях эксплуатации.

Литература

1. **Егорова О.Н. и др.** Одночастотный волоконный лазер на фоточувствительном активном волокне с повышенной радиационной стойкостью // Фотон-экспресс. 2023. № 6 (190). С. 458–459.
2. **Ганжа В.С., Марарескул Т.А., Муратов Д.С.** Калибровка бортовой аппаратуры измерения псевдодальности между космическими аппаратами для повышения точности определения расхождения их шкал времени // Известия вузов. Машиностроение. 2021. № 12 (741). С. 100–106.

Д.Ю. Киселёв, студ.; рук. А.Ю. Поройков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В современной промышленности и науке широко развивается сфера робототехнических систем, позволяющая значительно увеличить эффективность и степень автоматизации. Одним из главных компонентов таких систем являются системы технического зрения, которые обеспечивают контроль процессов, повышая точность и скорость измерений.

Принципиальная схема системы технического зрения включает готовые элементы: видеокамеры с объективами, источник освещения, объект контроля и вычислительную машину с ПО. Основной упор часто делается на алгоритмы обработки изображений, в то время как расчёту параметров аппаратной части — камеры, объектива и освещения — не уделяется достаточное внимание.

При проектировании необходимо определить параметры камеры, объектива и источника излучения, исходя из известных характеристик объекта и условий съёмки. Корректный подбор параметров на основе расчёта пространственных и энергетических характеристик — сложная задача. Некорректный подбор приведёт к некачественным изображениям и снижению эффективности системы. Алгоритмы обработки не могут полностью компенсировать низкое исходное качество.

Анализ литературных источников показал отсутствие целостной методики именно для расчёта пространственных и энергетических параметров. Готовые решения в основном ограничены подбором фокусного и рабочего расстояния для камер видеонаблюдения. Целью проекта является разработка такой методики и её реализация в виде программного обеспечения.

На основе анализа связи параметров компонентов и критериев качества системы были получены зависимости для расчёта и подбора элементов. По ним разработано ПО, которое вычисляет необходимые параметры под заданные условия и выбирает подходящие компоненты из каталога или сообщает об их отсутствии.

Литература

1. **Евтихиева О.А.** Геометрическая оптика: учебное пособие по курсу «Геометрическая оптика»: МЭИ, 2024.
2. **Адаменко М.В.** Цифровые фотоаппараты: Майор, 2004.

*К.С. Александров, студ.;
рук. А.С. Акентьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЗАТВОРА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА RTP МЕТОДОМ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНОСКОПИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ

Лазерная коноскопия — многофункциональный метод диагностики, актуальный в дефектоскопии и метрологии монокристаллов, применяемых в оптике. Он заключается в оценке интерференционных картин, получаемых при прохождении поляризованного когерентного излучения через кристалл. Метод позволяет исследовать оптические характеристики и свойства анизотропных монокристаллов — двулучепреломление, ориентацию и количество оптических осей, наличие или отсутствие гиротропии, дихроизма, оптические аномалии кристаллов, в том числе в динамике при наличии внешних воздействий [1].

Кристалл титанил-фосфата рубидия (RTP) широко используется в нелинейной оптике и электрооптических приборах. Его преимущества: высокая лучевая стойкость, высокое сопротивление, негигроскопичность, отсутствие наведенного пьезоэлектрического эффекта [2].

Целью работы является изучение свойств кристалла RTP лазерным коноскопическим методом для дальнейшего использования в составе высокочастотного лазерного передатчика. В работе автором были получены коноскопические картины электрооптического затвора и проведен сравнительный анализ с картинками затвора иностранного производства.

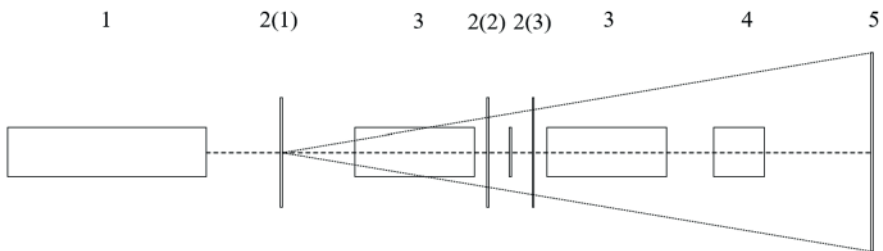


Рис. 1. Схема эксперимента

1 — лазер; 2 — рассеиватель; 3 — ЭОЗ; 4 — поляризатор; 5 — экран

Литература

1. **Пикуть О.Ю., Рудой К.А.** Лазерная коноскопия монокристаллов излучением с ортогональными поляризациями // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 4(154). С. 1–8.
2. **Hussain A.A., Alnayli R.S., Hasan S.Y.** Performance optimization of the electro-optic Q-Switching for high power laser using RTP crystal // Journal of Advances in Physics. 2016. Vol. 11. №. 6. P. 3346–3352.

В.В. Неткачев, студ.;
рук. Н.М. Скорнякова, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И КОНВЕЙЕРА ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Актуальной задачей в области анемометрии по изображениям частиц (АИЧ) является разработка систем, способных работать в полевых условиях с минимальной задержкой обработки. Существующие алгоритмы на основе свёрточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN) демонстрируют высокую точность, но имеют значительную вычислительную сложность, что приводит к задержкам в 100–200 мс на кадр и делает их непригодными для использования [1]. В данной работе предлагается комплексный подход к оптимизации CNN и архитектуры обработки видеопотока, направленный на достижение целевой задержки менее 50 мс без существенной потери точности.

Основные направления оптимизации включают:

1. Архитектурные изменения CNN — применение нейросетевых архитектур с разделяемыми свёртками, сокращение количества фильтров и использование методов сжатия моделей (прунинг, квантизация) для уменьшения вычислительных затрат [2].
2. Конвейеризация обработки — разделение алгоритма на независимые стадии (захват кадра, предобработка, вывод сети, постобработка векторов), выполняемые параллельно в разных потоках, что позволяет скрыть задержку нейросетевого вывода.
3. Адаптивная предобработка — динамическое выделение области интереса и снижение разрешения входного изображения при сохранении ключевых деталей для уменьшения размера входных данных для CNN.

Верификация подхода проводилась на синтезированных и реальных изображениях трассерных частиц. В результате удалось сократить время обработки одного кадра до 45 мс при работе на стандартном вычислительном оборудовании, что в 2–3 раза быстрее базовой реализации.

Разработанный оптимизированный конвейер позволяет в перспективе перенести имеющуюся программную реализацию на малопотребляющие встраиваемые системы для создания компактного мобильного измерительного прибора.

Литература

1. **Reddy Yu.A., Wahl J., Sjö Dahl M.** Twins-PIVNet: Spatial attention-based deep learning framework for particle image velocimetry using Vision Transformer // Ocean Engineering. 2025. Vol. 318. P. 120205.
2. **Basha S.H.Sh., Tula D., Vinakota S.K., Dubey Sh.R.** Target aware network architecture search and compression for efficient knowledge transfer // Multimedia Systems. 2024. Vol. 30, No. 2. P. 81.

Секция 7
РАДИОСИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ
Radio navigation and communication systems

Председатель секции: д.т.н., доцент Куликов Роман Сергеевич

Секретарь секции: к.т.н. Силаева Елена Владимировна

*Н.В. Морозов, А.С. Карпова, студенты;
рук. А.Ю. Сизякова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОЙ РСПИ С ПОЛЯРНЫМ КОДЕКОМ

В условиях передачи множества сигналов уровень помех увеличивается. Для обеспечения требуемого качества обслуживания абонентов используется помехоустойчивое кодирование. От простых кодов, вроде CRC, кода Хемминга, переходят к более сложным кодам, вроде кодов Рида-Соломона, БЧХ. В последнее время в аппаратуре используются коды с малой плотностью проверок на чётность (LDPC). Поскольку по LDPC кодам существует множество исследований и разработок, то представляют интерес другие способы кодирования. Таковым является кодирование с использованием полярных кодов. Это новые коды, которые еще не стандартизированы и находятся на этапе исследований.

Цель работы — разработка и анализ характеристик помехозащищенной радиосистемы передачи информации (РСПИ) с полярным кодом.

В данной работе описаны технологии полярного кодирования и полярного декодирования по алгоритму последовательного исключения (SC) и списочного последовательного исключения (SCL). Построены имитационные модели РСПИ с полярным кодом, реализующие алгоритмы SC и SCL декодирования. Для каждой из моделей проведен расчет зависимости вероятности битовой ошибки на выходе декодера от отношения сигнал-шум в канале связи при одинаковой и при разной относительной скорости кодирования. Проведен анализ помехоустойчивости полученных систем с алгоритмами SC и SCL декодирования.

Литература

1. **Arikan E.**, Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels / E. Arikan // IEEE Transactions on Information Theory. — 2009. — July. — Vol. 55, no. 7. — P. 3051–3073.
2. **Arikan E.**, Systematic polar coding / E. Arikan // IEEE Communications Letters. — 2011. — August. — Vol. 15, no. 8. — P. 860–862.
3. **Хмельков А.Н.**, Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах связи: учеб. пособие для вузов / А.Н. Хмельков, В.А. Минеев.. — М.: Горячая линия-Телеком, 2023. — 360 с.

*А.С. Белянушкин, соиск.;
рук. А.Ю. Шатилов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИМИТОСТОЙКИЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ В ПРИЁМНИКЕ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Одной из критических проблем при работе навигационной аппаратуры потребителей (НАП) является наличие имитационных помех. Цель имитационной помехи — «увод» НАП с реального местоположения на ложное. В последние годы эта проблема стала актуальна на территории РФ, где сложилась уникальная в мире помеховая обстановка. По этой причине проблема защиты от имитационных помех стала одной из наиболее приоритетных. Осложняет задачу ещё тот факт, что использование фазированной антенной решётки (одного из самых основных методов борьбы с шумовыми помехами) не позволяет полностью решить проблему борьбы с имитационными помехами. Целью доклада является обзор известных алгоритмов достоверного решения навигационной задачи в условиях имитационных помех.

В докладе приводится классификация видов имитационных помех и классификация видов воздействия, которые оказывают имитационные помехи на НАП в режиме поиска и слежения за сигналом. Рассматриваются показатели качества НАП при работе в условиях имитационных помехами.

Основное внимание уделяется методам достоверного решения навигационной задачи в условиях имитационных помех. Известные методы не гарантируют на 100% достоверного навигационного решения с тем учётом, что средства постановки имитационных помех постоянно совершенствуются, а их скорость развития гораздо больше, чем скорость развития НАП. Обзор публикаций из международных журналов, например [1, 2], показывает, что методы решения проблемы проработаны не достаточно.

Перспективой использования полученных результатов является разработка и внедрение в НАП имитостойкого алгоритма решения навигационной задачи.

Литература

1. **Mark L. Psiaki and Todd E. Humphreys.** GNSS Spoofing and Detection, Proceedings of the IEEE (Volume: 104, Issue: 6, June 2016).
2. **Daniel do Prado Allao, Isadora G. Ferrao, Vitor Marc, Lucas Gonzalez Da Silva, Kalinka C. Branco.** A Systematic Review of GPS Spoofing: Methods, Tools, Tests, and Techniques in the State of the Art, 2025 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) North Carolina, USA May 14–17, 2025.

*П.Ю. Анучин, студ.; В.В. Чистяков, вед. инженер;
А.Д. Разорвин, студ.; рук. О.В. Глухов, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО ГНСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТЕКСТ-ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СРЕДЫ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) широко применяются в мобильных устройствах, транспортных средствах, беспилотных и автономных системах. В условиях открытого неба они обеспечивают метровую и суб-метровую точность позиционирования, однако в городской застройке, лесной местности, туннелях эффективность ГНСС существенно снижается.

Перспективным направлением повышения надёжности навигации является применение методов контекст-детектирования окружающей среды, основанных на автоматическом распознавании типа сцены. В качестве информативных признаков используются отношение мощности несущей к спектральной плотности шума, статистические характеристики его изменчивости, число видимых навигационных спутников, остатки псевдодальностей, индексы многолучевости, а также данные о зонах беспроводного покрытия и показания барометрического датчика.

Для решения задачи классификации применяются детерминированные и вероятностные методы (пороговые алгоритмы, скрытые марковские модели), а также методы машинного обучения, включая метод опорных векторов, ансамбли решающих деревьев и нейронные сети. Наибольшую точность распознавания (до 92–98%) обеспечивают рекуррентные нейронные сети с учётом временной динамики изменений навигационных параметров. Распознанный контекст используется для адаптивной настройки фильтров навигационной обработки, и реализации мультисенсорной интеграции.

В данной работе выполнен обзор и сравнительный анализ существующих методов контекст-детектирования и контекст-адаптивной навигации, рассмотрены возможности повышения точности позиционирования, определены перспективные направления развития.

Литература

1. Li Y., Jiang Z., Qian C., Huang W., Yang Z. «A Deep-Learning Based GNSS Scene Recognition Method for Detailed Urban Static Positioning Task via Low-Cost Receivers.» Remote Sensing 2024, 16(16), 3077. DOI: 10.3390/rs16163077.
2. Ding Y., Feriol F., Watanabe Y., Asseman P., Pages G., Vivet D. «Adaptive Robust-Statistics GNSS Navigation Based on Environmental Context Detection.» Proceedings of the 2023 International Conference on GNSS, февраль 2023. DOI: 10.33012/2023.18636.

В.В. Чистяков, вед. инженер; П.Ю. Анучин, студ.;
О.В. Глухов, аспирант (НИУ «МЭИ», Москва)

АППАРАТНО-ЭФФЕКТИВНЫЙ МОДУЛЬ MICRO-ATTENTION ДЛЯ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕО НА SOC-FPGA

Трансформерные видеомодели обеспечивают высокую точность анализа видеопотоков, однако классическое self-attention требует квадратичных вычислений и хранения большого KV-кэша, что затрудняет использование на SoC-FPGA с ограниченными ресурсами [1]. Для обхода этих ограничений активно развиваются методы стримингового внимания с фиксированным KV-буфером и стратегиями вытеснения токенов [1], а также подходы к сжатию KV-кэша, включающие low-rank аппроксимацию и norm-based отбор наиболее значимых векторов [2]. Дополнительно показано, что видеомодели устойчивы к 8-битной квантизации активаций, что делает их подходящими для аппаратной реализации. Исследования FPGA-ускорителей внимания подтверждают эффективность конвейеризации, тайлинга и низкоразрядной арифметики для снижения энергопотребления и нагрузки на память [3].

Цель работы — разработать компактный модуль *micro-attention* для SoC-FPGA, сочетающий фиксированный объём KV-памяти, norm-based критерии отбора и 8-битную квантизацию внимания.

Предложена архитектурная схема модуля, включающая блок оценки норм KV-векторов, квантизатор и компактное attention-ядро, реализуемое в конвейерном режиме. Такой подход позволяет уменьшить объём памяти и вычислительную сложность, обеспечивая применимость трансформерных механизмов в встроённых видеосистемах. Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование вычислительных затрат и создание упрощённого прототипа.

Литература

1. **Yang Y. et al.** StreamMem: Streaming Memory for Efficient Long Video Understanding. *arXiv:2508.15717*, 2025.
2. **Liu A. et al.** MiniCache: KV Cache Compression via Low-Rank and Token Selection. *arXiv:2405.14366*, 2024.
3. **Kabir E. et al.** FAMOUS: FPGA-based Multi-Head Attention Accelerator. *arXiv:2409.14023*, 2025.

П.В. Кузнецов, асп.; рук. Р.С. Куликов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОИСК СИГНАЛА ГНСС В УСЛОВИЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Наиболее чувствительным к уровню принимаемого отношения сигнал/шум (ОСШ) является фаза поиска сигнала ГНСС. В сложных условиях приема повышение ОСШ на единицы децибел критически важно для успешного обнаружения. В условиях приема слабого сигнала от спутников, на линии визирования близкой к горизонту, накопление сигнала может не дать необходимого преимущества, если не учитывать релятивистские эффекты искажения сигнала [1]. Помимо сдвига несущей частоты из-за эффекта Доплера необходимо учитывать сжатие сигнала при высокой скорости относительного движения передатчика и приемника.

Изменение длительности сигнала рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = T_0 \left(\sqrt{(1 - \beta)/(1 + \beta)} - 1 \right), \quad (1)$$

где $\beta = v/c$, c — скорость света, v — скорость сближения. При времени накопления 20 мс, равного длительности одного символа данных навигационного сообщения, для сигнала с минимальной длительностью символа дальномерного кода Galileo E5a / E5b равной 97,75 нс, максимальной скорости сближения спутника равной 929 м/с [2], при движущемся приемнике со скоростью равной 300 м/с для высокоскоростных БПЛА, итоговой относительной скоростью сближения спутника и приемника равной ~1200 м/с, сжатие во времени составляет: ~80 нс. С привлечением специальных алгоритмов время накопления может быть увеличено, что приведет к еще большему абсолютному сжатию сигнала, поэтому такое искажение необходимо компенсировать.

Предложен способ цифровой обработки сигнала ГНСС, оцифрованного с высокой частотой дискретизации в широкой полосе частот для оценки частоты Доплера и последующей генерации опорного дальномерного кода для компенсации эффекта сжатия сигнала.

Математическое моделирование показало возможность приема сигналов ГНСС для решения задачи поиска. При учете сжатия сигнала дополнительный выигрыш в ОСШ составил более 1,2 дБ.

Литература

1. **Ayso, E.; Kahveci, M.** Impacts of relativistic effects on GNSS signal path and precise point positioning. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adddd3>
2. **Tsui J.B.-Y.** Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. — New York: John Wiley & Sons, 2000. — 255 p. — ISBN 0-471-20054-9.

Секция 8

ФОТОНИКА

Photonics

Председатель секции: к.ф.-м.н., доцент Туркин Андрей Николаевич

Секретарь секции: Иликеева Римма Анваровна

Р.Р. Сафин, асп.; В.Р. Иванова, к.т.н., доц. (КГЭУ, Казань)

О РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ

Известны различные сценарии создания «умных» систем освещения, к ним относятся системы с плавным изменением уровня яркости светодиодов (СД); автоматические системы включения/выключения освещения по расписанию; системы управления с использованием датчиков движения/присутствия, датчиков освещенности; системы управления освещением, которые объединяют все осветительные приборы в одну сеть и с помощью программного обеспечения позволяют осуществлять управление с единого центра либо с помощью мобильного приложения; системы управления освещением с возможностью адресного управления каждым светильником (*PLC Systems; DALI, KNX, RDM*); системы с использованием искусственного интеллекта, благодаря которому возможно автоматически адаптировать работу светильников на основе анализа данных о поведении пользователей [1, 2]. Разнообразие реализаций сценариев в основном нацелено на снижение энергопотребления.

В работе предлагается создание интеллектуальной системы управления освещением, функционирующей по алгоритму воспроизведения качественных характеристик естественного света (цветовая температура T , K и индекс цветопередачи R_a). Система предполагает построение спектрального состава светотехнических изделий, созданных на основе СД, максимально приближенного по качественным светотехническим параметрам к распределению естественного света в зависимости от географической широты и долготы, а также времени суток. Известно, что солнечный свет обладает непостоянством интенсивности и спектрального состава излучения, эти параметры меняются в течение дня. Поэтому для разработки алгоритма использованы данные эмпирических исследований спектрального состава естественного света, собранные в течение длительного времени, выявлен характер изменения спектрального распределения в течение дня, определены максимальные значения индекса цветопередачи.

Литература

1. **Дыбов, Р.С.** Система интеллектуального светодиодного освещения / Р.С. Дыбов, Е.И. Широкова // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. — 2020. — № 3. — С. 187.
2. **Иванова В.Р., Иванов И.Ю.** Контроль уровня освещенности рабочей поверхности с помощью интеллектуального блока управления светильника. Сборник докладов V Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи — ТПУ-2014». Т. 2, с. 11–14.

*А.А. Горшкова, студ.; рук. В.С. Возняк, к.ф.-м. н., мнс
(МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)*

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГАДОЛИНИЙ-ИТТРИЕВЫХ ВАНАДАТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

Ортованадаты редкоземельных элементов (AVO_4) — стабильные люминофоры, широко применяемые в бесконтактной оптической термометрии [3], защите изделий от подделок [2], медицине [1]. Создание твердых растворов на их основе — эффективный способ управления люминесцентными свойствами.

В данной работе исследованы люминесцентные свойства твердых растворов $Y_{1-x}Gd_xVO_4:0.5 \text{ мол\% } Eu^{3+}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$). Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью механизмов переноса энергии на центры свечения в данной системе. Для более подробного анализа ванадатных систем была также привлечена серия $Y_{1-x}Sc_xVO_4:0.5 \text{ мол\% } Eu^{3+}$ ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1$), в которой ранее не было детально изучено уширение и смещение полос люминесценции.

Экспериментально полученные спектры люминесценции состоят из серии узких полос, соответствующих внутриконфигурационным $4f-4f$ переходам в ионе Eu^{3+} . Для серии $Y_{1-x}Gd_xVO_4:Eu^{3+}$ была проведена оценка ширины оптической запрещенной зоны и интегральной интенсивности люминесценции при длинах волн возбуждения 325, 396 и 467 нм. Также в ходе работы было детально проанализировано смещение и уширение полос люминесценции в обеих сериях твердых растворов.

Литература

1. **A.S. Laia et al.** Luminescent thermometry with $YVO_4:Er/Nd$: Achieving high sensitivities within the 1st and 2nd biological windows // *Journal of Luminescence* — 2024 — № 265 — с. 120239.
2. **Jiantao Lu et al.** Dual-mode luminescence and anti-counterfeiting application of $YVO_4: Eu^{3+} @SiO_2@CDs$ nanocomposites // *Journal of Alloys and Compounds* — 2025 — № 1010 — с. 177664.
3. **Lixin Peng et al.** A multi-mode self-referenced optical thermometer based on low-doped $YVO_4: Eu^{3+}$ phosphor // *Journal of Luminescence* — 2023 — № 263 — с. 120168.

*Е.П. Василев, аспирант,
рук. П.А.Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ В ЗАКРЫТОМ ГРУНТЕ И ТЕПЛИЦАХ

Для эффективного прохождения фотобиологических процессов в растениях требуется особый спектр излучения и благоприятная внешняя среда. Это обусловлено тем, что каждому пигменту соответствует свой индивидуальный спектр поглощения и, соответственно, своя спектральная характеристика световой активности возбуждающего излучения [1]. Для достижения максимально возможного результата при выращивании в искусственной среде, необходимо понимание, при каких параметрах облучения, будет наилучший результат в виде биомассы/плодов [2].

С этой целью авторами исследования был произведён комплексный анализ и произведена теоретическая оценка разнообразных фотобиологических процессов (в частности влияние спектрального состава излучения на протекание реакций и возможность его изменения в течении цикла роста растений), а так же влияние на конечный результат в виде биомассы/массы плодов, на основе чего были произведены разработки светодиодных модулей и был поставлен практический эксперимент, в котором производилось изменение спектрального состава излучения.

Результаты, полученные в ходе этой работы, могут иметь как прикладную ценность при проектировании установок для выращивания в искусственных условиях (теплицы и тд..), так и теоретическую для продолжения исследований в этом направлении, а так же базу для будущих более фундаментальных исследований в этом направлении.

Литература

1. **McCree, K.J.** (1972) Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191–216.
2. **Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г.** Оптимизация светотехнических параметров облучения при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей // *Светотехника*. — 2019. — № 4. — С. 6–13.

*Ф.Д. Федюнин, асп.; рук. А.Н. Васильев, д.ф.-м.н., проф.
(физический факультет МГУ, Москва)*

ВЛИЯНИЕ КАТИОННОГО СОСТАВА НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГРАНАТОВ

Кристаллы гранатов, легированные ионами Ce^{3+} , являются перспективными скинтилляторами. Например, $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$, планируется использовать в калориметре модернизированного Большого адронного коллайдера [1]. Эти кристаллы характеризуются достаточно высокой плотностью и хорошим энергетическим разрешением [2]. Люминесценция гранатов обусловлена переходами $5d-4f$ в ионах Ce^{3+} . Наличие медленных компонент в кинетике Ce^{3+} является недостатком. Изменение катионного состава позволяет постепенно изменять свойства кристаллов и оптимизировать процессы переноса энергии от матрицы к активатору. Кроме того, частичное разупорядочение структуры, характерное для многокомпонентных гранатов, положительно влияет на процессы переноса энергии к церию [3, 4]. В настоящей работе рассмотрено влияние катионного состава на люминесцентные и оптические свойства ряда многокомпонентных гранатов. Особое внимание уделено влиянию скандия на свойства гранатов.

Кристаллы $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce,Ca}$, $\text{Gd}_3\text{Al}_{1,5}\text{Sc}_1\text{Ga}_{2,5}\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{Gd}_3\text{Al}_{1,5}\text{Sc}_1\text{Ga}_{2,5}\text{O}_{12}:\text{Ce,Ca}$, были выращены методом Чохральского. Кристаллы $\text{Y}_3\text{ScAl}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{Gd}_{2,88}\text{Sc}_{1,89}\text{Al}_{3,23}\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\text{Tb}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$, были выращены методом Бриджмена. С использованием спектрофотометра PerkinElmer Lambda 950 были получены спектры поглощения и отражения. С использованием лабораторной установки по люминесцентной спектроскопии были получены спектры люминесценции, возбуждения люминесценции и кривые термостимулированной люминесценции.

На основе анализа спектров поглощения показана взаимосвязь между катионным составом гранатов и силой кристаллического поля, определена величина расщепления уровней $5d_1$ и $5d_2$ Ce^{3+} . Демонстрируется изменение ширины запрещенной зоны в зависимости от состава гранатов. В работе также обсуждаются особенности люминесцентных свойств, связанные с частичным замещением катионов алюминия и галлия скандием.

Литература

1. V. Alenkov, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 916, 226–229 (2019).
2. Sh. Kurosawa, et al., J. Cryst. Growth 393, 134–137 (2014).
3. M. Korzhik, et al., Crystals 12, 1196 (2022).
4. K. Bartosiewicz, et al., J. Mater. Chem. C 13, 13691–13712 (2025).

*Р.В. Дибольский, асп.; В.В. Кричевский;
рук. В.П. Коняев, к.ф.-м.н. (НИИ Полюс, Москва);
рук. А.Н. Туркин, к.ф.-м.н., доцент (МГУ, Москва)*

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Были проведены исследования полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) на основе гетероструктур InGaAs–GaAs–GaAlAs. ЛД работали в импульсном режиме накачки. Длительность и частота следования импульсов тока составляли 700 нс и 20 кГц. Длина волны излучения ЛД была 900–1000 нм. В работе исследовалась зависимость степени поляризации излучения от температуры и от конструкции прибора. Поскольку при изменении температуры лазера в слоях гетероструктуры возникают механические напряжения, то это приводит к изменению положений энергетических уровней электронов и дырок в активном слое ЛД, следствием чего является изменение поляризации излучения. Было показано, что зависимость поляризации от температуры определяется конструкцией излучающего элемента ЛД [1].

Литература

1. **Л.Н. Курбатов.** Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра // Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Физматкнига, 2013. — 400 с.

*А.Р. Обухов, студ.; рук. О.П. Меламед, к.т.н. (НИУ «МЭИ»);
А.Ю. Дунаев, к.т.н. (ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва)*

ОБНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАПРАВЛЕННОГО ПРОПУСКАНИЯ

Измерение оптических характеристик материалов широко используется в задачах спектрального анализа и различных отраслях промышленности, в частности, спектральный коэффициент пропускания — важный параметр, который нормируется, например, при оценке соответствия продукции требованиям Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 019/2011 [1], распространяющемся на средства защиты глаз от различных излучений. Поскольку требования и методы испытаний, установленные регламентом, определяются стандартами [2], гармонизированными с европейскими, то есть ряд существенных несоответствий между требованиями регламента и действующей государственной поверочной схемой для средств измерений коэффициента пропускания.

Для обеспечения достоверных и корректных измерений коэффициента пропускания, необходимо проведение ряда работ по усовершенствованию первичного эталона единиц спектрального коэффициента направленного пропускания (ГЭТ 156-2015). В основе модернизации эталонной базы лежит использование каскадных измерений для материалов с низким коэффициентом пропускания и введение ряда приемников для расширения измеряемого диапазона. Замена прямых измерений косвенными (относительно предварительно измеренного эталонного образца с близкими характеристиками пропускания), а также использование эталонного образца для воспроизведения верхнего диапазона шкалы пропускания (100%), позволят значительно повысить точность измерений. Также для расширения диапазона измерения коэффициента пропускания и реализации данного метода, будет использоваться дополнительный выход из монохроматора с другой длиной оптического хода и обновленные компоненты с улучшенными характеристиками.

Литература

1. **ТР ТС 019/2011.** Технический регламент Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты»: утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 878.
2. **ГОСТ 12.4.253-2013.** Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз и лица. Общие технические требования: издание официальное: дата введения: 2014-06-01. — Москва : Стандартинформ, 2014.

А.Т. Калаева, студ.; В.П. Будаков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ CIE LAB И CIE CAM16 ДЛЯ ЗАДАЧ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Цель работы — экспериментальное сравнение точности известной, используемой во многих областях модели CIE Lab и признанной как актуального стандарта CIE CAM16, для задач межстройственного цветовоспроизведения в современных условиях. Современные цифровые изображения выводятся на разнообразные устройства — мониторы, телевизоры, печатные системы — что требует минимальных визуальных расхождений между воспроизведениями, в условиях распространения цифровых медиа [1].

Эти различия обусловлены тем, что каждое устройство обладает собственным цветовым охватом, яркостью, гаммой, точкой белого и спектральными особенностями.

В отличие от работ, посвященных модификациям моделей, как у Ляо и Сюй [3], в данной работе оценивается точность в инженерных задачах, «чистых» CIE Lab и CAM16-UCS без модификаций для прогнозирования цветовых различий (ΔE).

Исследование проводилось на основе цифрового изображения, содержащего цветовой мишенью в формате RAW/DNG (Digital Negative). Преобразования данных в цветовые пространства CIE Lab и CAM16-UCS и расчет ΔE выполнялись с задействованием средств MATLAB. Визуальная оценка проводилась с группой из 13 наблюдателями в контролируемых условиях освещения.

Различия между моделями объясняются имеющейся хроматической адаптацией модели CAT16, встроенной в CIE CAM16, и отсутствием адаптационной компоненты в свою очередь CIE Lab. Модель CIE Lab, опирается на фиксированный источник D65 и не учитывает адаптацию, что ограничивает её способность при проведении сравнений между устройствами.

Литература

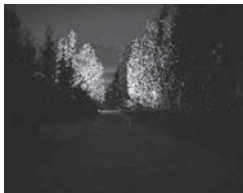
1. **Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)**. CIE Research Strategy. Version 2023-09. — Vienna: CIE, 2023. — 27 с. — URL: <https://doi.org/10.25039/vudfg44z> (дата обращения: 14.11.2025).
2. **Фершильд М.Д.** Модели цветового восприятия. — СПб.: Изд. А. Шадрина, 2006. — 437 с.
3. **Zhihui Liao, Lihao Xu** «Lightness modifications of the CIECAM16 and CIELAB based on the Helmholtz-Kohlrausch effect», Vol. 32, No. 25 / 2 Dec 2024 / Optics Express 44918.

*А.Е. Иванова, студ.; рук. Е.А. Алексеев, ст. преп.;
рук. Е.И. Ильина, к.т.н., ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЯРКОСТНОГО КОНТРАСТА НА ВОСПРИЯТИЕ ЛАНДШАФТА

Продуманное освещение повышает безопасность, комфорт, энергоэффективность и влияет на эмоции; цвет, блики и тени определяют восприятие среды. В работе проблемно-ориентированно исследуется пространственное восприятие модели ландшафтной среды, сопоставлены визуальные оценки с расчётами в модели CIESAM02.

В рамках исследования смоделированы 3 сцены освещения ландшафта. В первой сцене было представлено освещение только дальних объектов (рис. 1а). Во второй сцене было добавлено освещение вертикальной плоскости (рис. 1б). Третья сцена отличалась обилием световых акцентов и включала разнообразные объекты, охватывая как горизонтальные, так и вертикальные поверхности (рис. 1в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 1. Сцены освещения ландшафта: (а) сцена 1, (б) сцена 2, (в) сцена 3

В исследовании участвовали 16 специалистов, которые по шкале Ликерта оценивали сцену по критериям: яркость, цвет, безопасность, удовольствие и комфорт, указывая степень своего согласия или несогласия с каждым суждением, от «ужасно» до «отлично» в численном диапазоне от 1 до 7 баллов. Исследование проводилось совместно со специалистами компании «Лаборатория света» (<https://laboratoriasveta.ru/>)

Сцена 1 с меньшей яркостью и без ближних акцентов получила минимальные оценки. В сценах 2 и 3 появление ближних световых акцентов повысило показатели, особенно безопасность, при среднем уровне комфорта. Это подтверждает, что более низкие, но сбалансированные уровни яркости усиливают ощущение безопасности и снижают энергопотребление и световое загрязнение. Дальнейшее исследование направлено на определение количественных показателей уровней яркости.

Литература

1. **Смирнов А.В., Кузнецов П.А.** Учет зрительной адаптации при проектировании световой среды города // Светотехника. 2017. № 5. С. 34–40.
2. **Saad R., Portnov B.A., Kliger D.** The Feeling of Safety by Pedestrians at Night: An Overlooked Aspect of Climate Change? // Sustainability. 2024. Vol. 16. 10402.

*Н.В. Сыч, студ.; рук. В.Ю. Снетков, к.т.н., доц.;
конс. Е.И. Ильина, к.т.н., ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПОДБОР ИСТОЧНИКА СВЕТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОД ЛИНЗУ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Актуальность разработки уличного светодиодного светильника с изменяемой коррелированной цветовой температурой (КЦТ) определяется запросами современной светотехники, в частности, рекомендациями по использованию приборов с регулируемым спектром для проектирования освещения в сумеречном диапазоне [1]. Однако использование двух разных светодиодов (СД) под одной оптикой порождает неисследованную проблему — их негативное влияние на кривую силу света и смешение цвета в световом пятне при отсутствии методов оценки. В рамках работы предлагается решить эту задачу, апробировав новый метод исследования эффектов.

Целью работы было сравнить два варианта расположения источников света под линзой осветительного прибора по степени смешения их спектров. Моделирование проводилось в программе TracePro. Оптическая система состояла из линзы для наружного освещения и СД с $T_{ц}=3000\text{ К}$ и $T_{ц}=5000\text{ К}$ (рис. 1, 2).

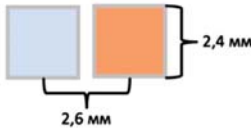
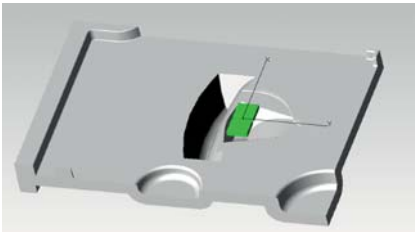


Рис. 1. Схема модели 1 метода

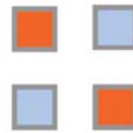
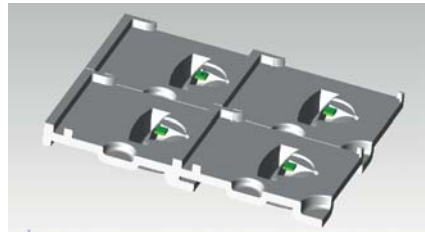


Рис. 2. Схема модели 2 метода

Оценка цветосмещения проводилась двумя методами: сине-красное смешение и разработанный подход, с заданием для каждой КЦТ основных шести длин волн (452 нм, 490 нм, 552 нм, 565 нм, 573 нм, 600 нм). Далее выполнялась оценка отклонения КЦТ в каждой точке светового пятна в программе, написанной в MATLAB.

Исследование показало, что схема с шахматной расстановкой рис. 2 имеет лучшее светосмещение, чем схема на рис. 1. Рекомендуется применять её из-за меньшего отклонения от средней КЦТ.

Литература

1. Сыч Н.В., Снетков В.Ю. Применение актуальной системы сумеречного зрения МКО для уличного освещения // Светотехника. — 2025. — № 1. — С. 55–59.

*В.А. Даренских, студ.; рук. А.Н. Туркин, к.ф.-м.н., доц.;
конс. Е.И. Ильина, к.т.н., асист. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАНИЯ КЦТ ОСВЕЩЕНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ВНИМАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧ НА ЧТЕНИЕ

Коррелированная цветовая температура освещения рабочих (учебных) мест является важным параметром, влияющим на комфорт, концентрацию внимания и, соответственно, производительность труда людей, выполняющих зрительные задачи на чтение. В учебных заведениях полезно применять осветительные приборы белого света с низкой цветовой температурой для снижения риска ухудшения остроты зрения [1]. В работе предлагается совместить рекомендуемое тёплое освещение с общепринятым для офисных и учебных помещений холодным; использовать для освещения рабочей поверхности стола освещение с одной цветовой температурой, а для освещения фона перед столом — другой; провести исследование на выявление лучшей комбинации цветовых температур освещения.

Целью работы было сравнение различных схем комбинирования цветовых температур при освещении рабочего места. Для начала исследования были выбраны два крайних случая — схема освещения рабочего места с использованием $T_{ц}=3000$ К для общего освещения и $T_{ц}=6500$ К для освещения фона (рис. 1) и схема освещения рабочего места с использованием $T_{ц}=6500$ К для общего освещения и $T_{ц}=3000$ К для освещения фона (рис. 2).



Рис. 1. Схема 1

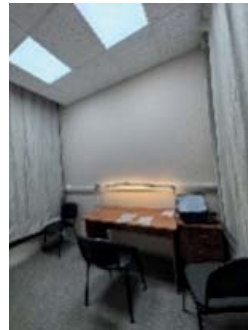


Рис. 2. Схема 2

Результаты показывают, что использование для освещения фона холодной цветовой температурой и тёплой — для освещения рабочей поверхности, позволяет улучшить концентрацию внимания и повысить производительность при выполнении задач на чтение.

Литература

1. А.А. Рябцева, П.П. Зак, А.С. Андрюхина [и др.]/Влияние спектрального состава искусственного освещения на остроту зрения лиц молодого возраста // Точка зрения. Восток — Запад. — 2017. — № 4. — С. 117–120. — EDN YUJCZJ.

*К.С. Честных, студ.; рук. А.В. Кистенева, ст. преп. (НИУ «МЭИ»),
конс. О.В. Кубряк, д.б.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕЩЕНИЯ НА ПОСТУРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТОЙКИ

Поддержание равновесия — один из ключевых аспектов двигательной активности человека, обеспечивающий устойчивость тела в пространстве. Световая среда влияет как на зрительное восприятие, так и на незрительные физиологические процессы, такие как регуляция циркадных ритмов, выработка мелатонина и уровень бодрствования [1–3]. Однако влияние параметров освещения на стабильность вертикальной позы остаётся недостаточно изученным. Это особенно актуально для разработки осветительных систем, способствующих улучшению работоспособности человека и снижению риска падений.

Целью данного исследования является изучение влияния характеристик световой среды на параметры стабильности вертикальной позы человека.

В ходе работы были проведены эксперименты на стабиллоплатформе для оценки стабильности вертикальной позы при различных условиях освещения. Разработана методика проведения экспериментов, включающая анализ статокинезиограммы при изменении освещённости [4].

Новизна исследования заключается в комплексном подходе к оценке влияния световой среды на стабильность позы с учётом как зрительных, так и незрительных эффектов света, а также в применении современных методов стабилометрии для количественной оценки баланса. Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций по оптимизации световой среды в офисах, учебных заведениях и медицинских учреждениях для улучшения работоспособности и снижения риска падений.

Литература

1. **Vetter C., Pattison P.M., Houser K.** A Review of Human Physiological Responses to Light: Implications for the Development of Integrative Lighting Solutions // LEUKOS. — 2022. — DOI: 10.1080/15502724.2021.1872383.
2. **Van Bommel W.J.M.** Interior Lighting: Fundamentals, Technology and Application // Switzerland: Springer Nature, 2019.
3. **Thapan, K., Arendt, J., Skene, D.J.** An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans // The Journal of Physiology. — 2001. — DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.
4. **Кубряк О.В., Мезенчук А.И.** Стабилометрия за 2 минуты. М.: Мера-ТСП, 2022.

О.Е. Илюхина, студ.; рук. В.А. Рыбина, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАССЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО КОЛОРИМЕТРА

Цель создания физиологического колориметра — обеспечить количественную оценку цвета, максимально приближенную к восприятию света человеческим глазом на уровне рецепторов. Большинство современных колориметров основаны на стандарте CIE 1931 XYZ, в котором функции сложения представляют собой математические абстракции. Отличительной особенностью данной работы является подбор фильтров колориметра таким образом, чтобы их спектральные кривые совпадали со спектральными чувствительностями LMS колбочек в системе $(LMS)_{phys}$ (рис. 1) [1].

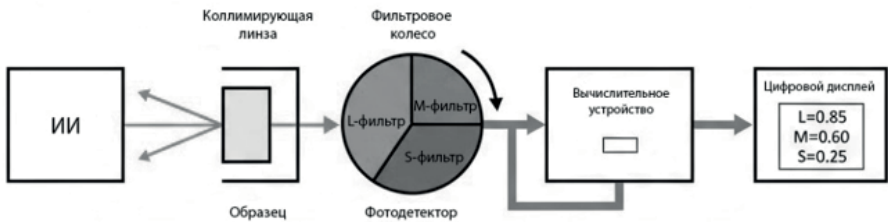


Рис. 1. Структурная схема колориметра

Для этого была разработана специальная программа, которая оптимизирует параметры многослойных оптических фильтров, адаптируя их спектральные характеристики к заданным эталонным кривым. В основе программы лежит метод последовательного приближения. Система аппроксимации построена по двухуровневому принципу: внешний цикл отвечает за грубую настройку параметров, а внутренний обеспечивает их точную подгонку. Кроме того, поддерживается как аддитивное, так и мультипликативное объединение фильтров с автоматическим перераспределением весовых коэффициентов.

Следующим этапом в процессе создания колориметра станет прототипирование, которое предполагает подбор рассчитанных фильтров и компонентов прибора, а также непосредственную сборку рабочего образца.

Литература

1. Боос Г.В., Григорьев А.А., Рыбина В.А. Исследование монохроматических порогов цветового зрения и определение удельных координат цвета трихромата // Светотехника. — 2022. — № 2. — С. 50–60.

А.Д. Шавкунов, студ.; Е.А. Алексеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА УМНОЙ ОПОРЫ ОСВЕЩЕНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАНДШАФТНЫХ ЗОНАХ

Уличное освещение переживает переход от традиционной инженерной подсистемы к платформе городских сервисов. Опора перестаёт выполнять роль исключительно несущей конструкции для светильника и становится узлом городской цифровой экосистемы: в ней интегрируются подсистемы освещения, сенсорики, телекоммуникаций и вычислительной обработки данных (рис. 1.). В существующих реализованных решениях для умных опор основное внимание уделяется расширению набора сенсоров, средств связи и вычислительных модулей, тогда как светотехническая часть, как правило, представлена единым модулем общего освещения [1].

Предлагаемая концепция умной опоры основана на трёх уровнях освещения, что обеспечивает для человека комфорт, безопасность, расширенный функционал и сервис. Нижний модуль обеспечивает визуальную маркировку маршрутов и комфортное освещение пешеходной зоны. Средний модуль работает как информационный — формирует статические/динамические световые/графические сообщения для навигации, оповещения и визуализации состояния городской среды. Верхний модуль выполняет утилитарную функцию общего управляемого освещения. Совместное управление тремя модулями позволяет разделять функции навигации, информирования и обеспечения видимости, оптимизируя энергопотребление и снижая световое загрязнение.

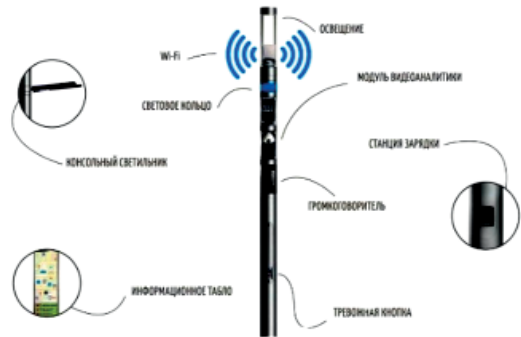


Рис. 1. Вариант компоновки умной опоры уличного освещения

Литература

1. Никитин М.С., Тычков А.Ю. Система интеллектуального городского уличного освещения на основе IoT-платформы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 13–20.

Д.М. Казаков, студ.; рук. Е.А. Алексеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРЬЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Гибридная система освещения состоит из нескольких подсистем: 1) система улавливания и передачи естественного дневного света; 2) интегрированная система искусственного освещения; 3) система датчиков для контроля освещенности и система управления компонентами системы освещения. Современные технологические решения в этой области позволяют рассмотреть новые решения в части коллиматорных вводных устройств (линзовые системы, когда поворотные линзы-коллиматоры следят за солнцем и транслируют свет через оптоволоконно, фокусируя его через линзу или трафарет). Моделирование пучка света на выходе позволяет точно направить его в «традиционный» зеркальный световод [1], с последующим перенаправлением света в пределах общей площади интерьера.

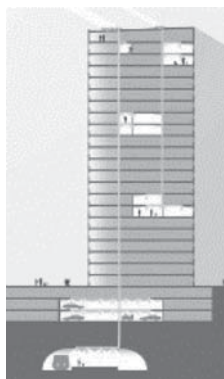


Рис. 1. Схемы освещения

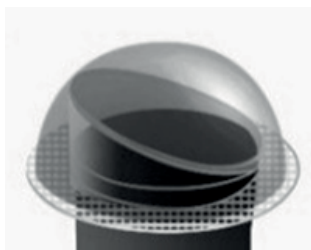


Рис. 2. Пассивное вводное устройство

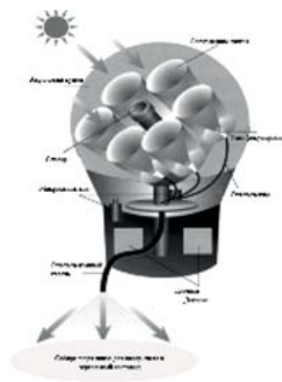


Рис. 3. Активное вводное устройство

Рассматривается возможность создания гибридной системы освещения, с применением активного коллиматора, и комбинации оптоволоконного узла сбора света с полым зеркальным световодом. Такой технический прием позволяет гораздо более эффективно использовать естественное солнечное излучение с максимальным зрительным комфортом и эффективностью.

Литература

1. Сенгис М.С. Комбинированное применение естественного и искусственного освещения в архитектурных проектах зданий. Светотехника // Светотехника. 2022, № 1.

Секция 9
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
Industrial electronics

Председатель секции: д.т.н., доцент Асташев Михаил Георгиевич

Секретарь секции: к.т.н. Серегин Дмитрий Андреевич

Е.С. Королев, студ.; рук. П.А. Воронин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Разработка энергоэффективных силовых преобразователей является одной из ключевых задач современной силовой электроники. Особое внимание уделяется сетевым выпрямителям с коррекцией коэффициента мощности (ККМ), так как их массовое применение определяет общие потери в электрических сетях. В работе исследуется импульсный преобразователь, выполненный по схеме повышающего преобразователя [1], который является наиболее распространенным решением для реализации ККМ.

Целью настоящего исследования является анализ потерь мощности в ключевом элементе преобразователя — силовом MOSFET-транзисторе — и разработка методики выбора его режима работы для минимизации коммутационных и проводимых потерь. Общие потери определяются по формуле:

$$P_{\text{потерь}} = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}} \quad (1)$$

где $P_{\text{стат}}$ — статические потери мощности; $P_{\text{дин}}$ — динамические потери мощности.

В результате моделирования установлено, что оптимальным с точки зрения суммарных потерь является режим квазирезонансной коммутации. Этот режим позволяет реализовать переключение ключа при нулевом напряжении, что дает возможность существенно снизить динамические потери на включение по сравнению с традиционным жестким переключением [2]. Измерения подтвердили, что применение данного режима позволяет повысить КПД преобразователя на 1,5–4% в диапазоне нагрузок от 30% до 100%.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования данных алгоритмов управления и могут быть использованы при проектировании энергоэффективных систем электропитания.

Литература

1. Белоус А.И., Солодуха В.А. Основы силовой электроники. — М.: Техносфера, 2023.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. — Изд. 2-е. — М.: Издательство БИНОМ, 2014.

*А.Д. Матвеева, Д.В. Савин, А.А. Сизикова, студенты;
рук. Д.А. Серегин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ХИМИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТОКА

В автономных системах электропитания, основанных на химических источниках тока (ХИТ), критически важным аспектом является выбор схемотехнической топологии преобразователя. Выходные параметры ХИТ существенно зависят от степени заряда, температуры и возраста батареи (рисунок 1), что приводит к необходимости применения адаптированных решений для стабилизации напряжения и обеспечения требуемых режимов работы нагрузки.

В данной работе проведён сравнительный анализ различных схемотехнических решений с учётом диапазона возможных изменений напряжения питания. Рассмотрено влияние характеристик ХИТ на стабильность выходного напряжения.

Проведена верификация аналитических результатов с помощью среды LTspice.

Составлена сравнительная классификация, в которой систематизированы основные преимущества и недостатки рассматриваемых схемотехнических решений.

На основании проведённого анализа сформулированы рекомендации по выбору схемотехнического решения преобразователя в зависимости от допустимого диапазона входных напряжений и требований к качеству электропитания нагрузки.

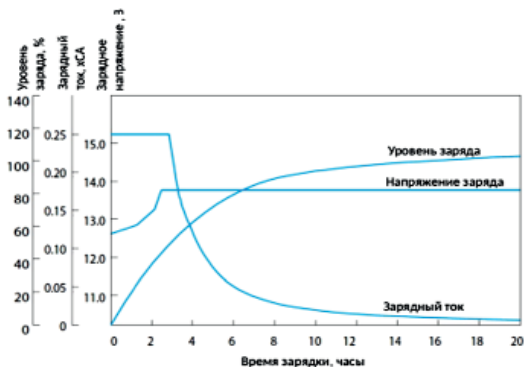


Рис. 1. Характеристика заряда свинцово-кислотного АКБ B12024GP при температуре 25 °C

*Д.В. Савин, А.Д. Матвеева, А.А. Сизикова, студенты;
рук. А.Н. Рожков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ БАЛАНСИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНДЕНСАТОРАХ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ

В многоуровневых инверторах стабильность уровней выходного напряжения и корректная балансировка внутренних конденсаторов являются ключевыми факторами для надёжной работы силовой части. Наиболее значимые проблемы многоуровневых инверторов, содержащих более трёх уровней, связаны с несимметричным зарядом и разрядом конденсаторов, повышенной чувствительностью выходного напряжения к последовательности переключений и резким увеличением количества допустимых состояний ключей, что усложняет управление и требует специальных алгоритмов балансировки.

В данной работе выполнен комплексный анализ схемотехнических и алгоритмических решений для многоуровневых инверторов. Уделено особое внимание влиянию топологии, параметров конденсаторов и алгоритмов управления на стабильность уровней напряжений и качество выходного сигнала.

Проведено математическое моделирование динамики напряжений в многоуровневом инверторе по схеме с плавающими конденсаторами и влияния последовательности переключений на уровни напряжений на конденсаторах. Модель верифицирована средствами MATLAB/Simulink и LTspice. Результаты подтвердили, что при неправильном выборе последовательности векторов происходит постепенный дрейф напряжений конденсаторов, тогда как оптимизированные стратегии управления обеспечивают их стабильную балансировку и формирование корректного многоуровневого выходного напряжения.

Проведено сравнительное рассмотрение основных методов управления многоуровневыми инверторами и оценена их эффективность в обеспечении балансировки напряжений на конденсаторах, стабильности уровней выходного напряжения, качества сигнала и количества переключений.

На основании анализа сформулированы рекомендации по выбору алгоритма управления в зависимости от требований к качеству выходного сигнала, допустимому уровню вычислительной нагрузки контроллера, диапазону входных напряжений и условиям эксплуатации.

*И.А. Чердинцев, студент; А.В. Бадалян, А.М. Эльхоли, асп.;
рук. А.Н. Рожков, к.т.н., доц.*

ИММИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ СО СТАЦИОНАРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Российский рынок показывает существенное отставание от мирового рынка по переходу на электромобили [1]. Одна из причин — неуверенность автовладельцев в доступности зарядных станций и малым запасом хода.

Система зарядных станций, использующих стационарные накопители энергии, является перспективным решением, особенно для мест, где отсутствует доступ к электроэнергии на удаленных участках магистралей. Актуальной задачей является определение оптимального расположения таких станций на всей протяженности магистрали.

В работе предложена имитационная модель силовой части зарядной станции со стационарным накопителем энергии и дополнительным источником энергии.

На рисунке 1 представлена схема разработанного в среде MATLAB Simulink DC/DC преобразователя с фазовым принципом управления. Данный преобразователь лежит в основе силовой части зарядной станции.

В результате работы модели формируется зависимость распределения мощностей работы составляющих частей зарядной станции от процента заряда электромобиля. Этот результат позволит оценить эффективность работы зарядной станций.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование методов и способов усиления мощности «быстрых» зарядных станций электромобилей с помощью накопителей электроэнергии» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

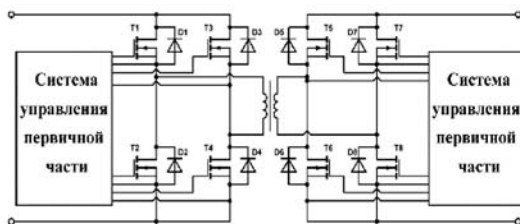


Рис. 1. DC/DC преобразователь

Литература

1. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России / Д.В. Санатов и др. — СПб.: Политех-пресс, 2021.

А.Д. Коцаренко, студ.; рук. Р.Н. Красноперов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СНЭ С ПОДДЕРЖКОЙ ГИБРИДНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Современные распределительные сети характеризуются ростом доли нестабильной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что требует применения интеллектуальных систем управления. Ключевым элементом для решения этой задачи являются системы накопления энергии (СНЭ), функциональность которых целиком определяется возможностями их микропроцессорных модулей управления.

В ходе исследования был проведён анализ требований к МСУ СНЭ, рассмотрены преимущества и недостатки классических и адаптивных методов управления [1]. На основе анализа была предложена гибридная архитектура, сочетающая детерминированный ПИ-регулятор и нейросетевой блок для компенсации нелинейности и адаптации параметров. В настоящей работе представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса МСУ, реализующего данный гибридный алгоритм на высокопроизводительном микропроцессорном модуле.

Аппаратная платформа построена на базе системы-на-кристалле Rockchip RK3568. Высокопроизводительные ядра Cortex-A55 обеспечивают работу с операционной системой и обработку данных с периферийных модулей. Расчёты нейросетевой поправки производятся на специализированном NPU, который выполняет интерфейс нейросети с высокой эффективностью, что позволяет не нагружать основные ядра CPU, что критично для систем реального времени.

Для сбора данных обучения нейросети в реальном времени реализована система обратных связей по току, напряжению и состоянию заряда аккумуляторных батарей. Коммуникационные возможности обеспечиваются встроенными контроллерами Ethernet и CAN с поддержкой промышленных протоколов обмена данными.

Выполнено сравнительное тестирование различных стратегий управления: приоритет стабилизации частоты, приоритет регулирования напряжения и комбинированный режим. На основании анализа сформулированы рекомендации по выбору алгоритма в зависимости от динамики нагрузки и параметров сети.

Перспективы развития системы связаны с использованием нейросетевых моделей для прогнозирования ресурса батарей.

Литература

1. **ГОСТ Р 58092.1-2021** Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения.

*А.А. Сизикова, студ.; М.С. Павлова, асп.; А.Д. Матвеева, студ.;
Д.В. Савин, студ.; рук. к.т.н., доц. Д.А. Серёгин (НИУ «МЭИ»)*

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ БЕЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЯЧЕЙКАМИ

В настоящее время на фоне роста потребителей электроэнергии увеличивается потребность в системах, способных вырабатывать большую мощность. В качестве системы, способной увеличивать выходную мощность рассматривается параллельное подключение инверторов напряжения на общую нагрузку.

При применении способа соединения источников «Ведущий-ведомый» инверторы связаны по цепям управления. Для синхронизации работы ячеек ведущим инвертором подается синхроимпульс. Параметры ведомых инверторов «подстраиваются» на основе информации о значении действующего тока, передаваемой ведущим инвертором. Недостаток данного метода заключается в наличии информационных связей между ячейками, что существенно снижает надежность системы.

Во многих сферах промышленности предъявляются высокие требования к надежности электрооборудования. В медицинской и военной сферах крайне важно непрерывно поддерживать энергообеспечение. Для выполнения текущих требований необходимо обеспечить непрерывную работу путём резервирования ячеек, а также применить подход без использования информационных связей между модулями, что существенно повысит отказоустойчивость и надежность всей энергосистемы.

Данный метод основан на управлении контурами обратной связи по активной и реактивной мощностям. В контуре обратной связи по активной мощности система управления отслеживает изменения и оказывает воздействие для уменьшения расхождения по частоте выходного сигнала. В контуре обратной связи по реактивной мощности осуществляется коррекция амплитуды.

Это позволяет осуществить непрерывную работу путем резервирования и распределение мощности между инверторами при выходе из строя одного или нескольких из них.

*К.В. Андросова, студ., Е.В. Глазунов, асп.
(НИЦ «Курчатовский институт»);
рук. Р.Н. Красноперов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ МОДУЛЕЙ С ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫМИ КОММУНИКАЦИОННЫМИ ИНТЕРФЕЙСАМИ

Современные вычислительные системы характеризуются экспоненциальным ростом требований к пропускной способности интерфейсов, что особенно критично для стратегических областей применения, включая оборонную промышленность, энергетику и телекоммуникации. Ключевым элементом для решения этой задачи являются микропроцессорные модули с пропускной способностью до 200 ГБ/с.

В ходе исследования проведен комплексный анализ проблем передачи высокочастотных сигналов в многопроводных линиях с учетом взаимного влияния переходных процессов, межсимвольной интерференции и неидеальности диэлектрических сред. На основе анализа разработана методология проектирования, интегрирующая схемотехнические решения, топологическую оптимизацию и современные производственные технологии.

В рамках работы планируется проведение комплексных исследований систем питания на базе многофазных преобразователей и маломощных стабилизаторов, обеспечивающих требования к качеству питания высокоскоростных интерфейсов. Для верификации целостности сигналов будет применен комплексный подход компьютерного моделирования с использованием электродинамических расчетов и SPICE-симуляции.

На основе полученных результатов исследований будет реализована многослойная печатная плата с применением материалов с низкими диэлектрическими потерями. Для минимизации паразитных эффектов планируется использование технологий обратного сверления, вырезов в опорных слоях и оптимизации дифференциальных пар. Экспериментальные исследования включают валидацию работоспособности приемопередатчика на скорости 25 Гбит/с с передачей тестовых паттернов.

Перспективы развития работы связаны с внедрением перспективных стандартов передачи данных, применением материалов с ультранизкими диэлектрическими потерями и разработкой адаптивных систем компенсации искажений сигналов в реальном времени.

Литература

1. **Никитин К.В.** Моделирование и верификация высокоскоростных интерфейсов в САПР // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. № 4. С. 25–31.

*А.Г. Халдобин, студент;
рук. Н.Г. Калугин, к.т.н., ООО «КВ Системы», Воронеж,
А.А. Пирогов, к.т.н., доц. ВГУ, Воронеж*

СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

В настоящее время в складских помещениях востребованы автономные мобильные роботы (AMR) для перемещения грузов без участия человека.

AMR требуется зарядка аккумуляторных батарей. Для автоматизации производственного процесса можно применять систему беспроводной передачи энергии (СБПЭ).

AMR целесообразно заряжать в квазидинамическом режиме т.е. в моменты остановки в ходе пошагового перемещения AMR по зарядной дорожке. В докладе рассматривается устройство силовой электроники для квазидинамического заряда.

Принцип действия изделия заключается в следующем: инвертор передатчика возбуждает колебания в передающем колебательном контуре. Индуктор передатчика генерирует переменное магнитное поле, которое наводит ток в приемном индукторе приемного колебательного контура.

Была создана модель беспроводной системы передачи энергии мощностью 1 кВт. Модель состоит из ЧИМ-контроллера, системы управления, силовой части с синхронным выпрямлением, резонансных контуров, выпрямителя приемной части. Было проведено исследование зависимости выходной мощности и КПД от коэффициента связи между катушками (см. рис. 1), а также изменение рабочей частоты и возможности мягкой коммутации ключей.

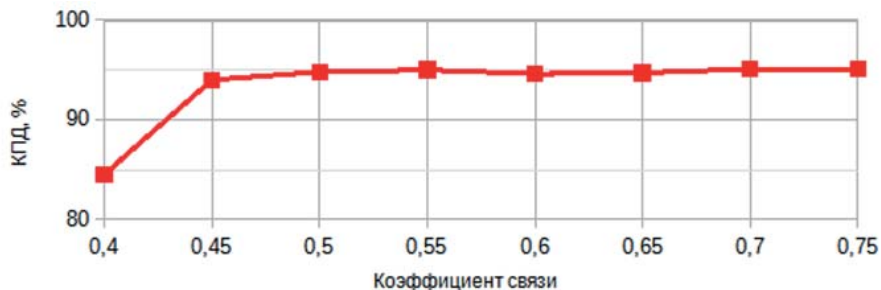


Рис. 1. График зависимости КПД от коэффициента связи катушек

Литература

1. A. Triviño-Cabrera, J. M. González-González, J. A. Aguado. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach. — Springer, 2019. — с. 175.

*С.Т. Джаббаров, студ., Хмелюк Д.П., студ., Часов А.В., к.т.н.;
рук. А.Н. Рожков, доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДОВ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционные робототехнические системы, основанные на электромагнитных двигателях, имеют ряд ограничений: неоптимальное энергопотребление, шум, низкий уровень локомоции (подвижности). Электростатические актуаторы (приводы) потенциально способны преодолеть эти ограничения, но предъявляют требования к обязательному наличию компактных высоковольтных источников питания, работающих на емкостную нагрузку, и специальных алгоритмов управления. Решение этих задач требует разработки специализированных преобразовательных систем.

Одним из перспективных направлений являются технологии создания электрического привода на базе искусственных мышц, обладающих одновременно низким энергопотреблением и высокой степенью свободы движений.

В рамках работы рассматривается ряд технологий создания искусственных мышц на основе: гидравлических самовосстанавливающихся электростатических актуаторов, низковольтных электростатических актуаторов, а также искусственных мышц на основе поливинилхлоридного геля [1]. Особенность использования данных технологий заключается в необходимости работы при напряжениях выше 700 В.

В работе сформулирована задача разработки компактного высоковольтного преобразователя, адаптированного для работы с емкостной нагрузкой. Предложена структура экспериментальной установки, включающая макет гидравлической электростатической мышцы и систему управления для проведения исследований в области разработки искусственных мышц.

Данная работа позволит сформировать методику проектирования подобных систем.

Литература

1. **Ли Т., Ван З., Ли Ю.** Легкая, эффективная и самовоспринимающая искусственная мышца для мягких роботов // *Science Advances*. — 2024. — Т. 10, № 25. — Ст. 10.1126/sciadv.adi9319.

А.А. Газин, студ., М.М. Ковалев, студ.;
рук. П.А. Рашитов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УСТРОЙСТВО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МК K5500BK018

Современные электросети требуют надёжных систем релейной защиты и автоматики (РЗА) для предотвращения аварий, локализации повреждений и защиты оборудования [1]. Устройство релейной защиты и автоматики позволяет своевременно обнаруживать короткие замыкания, перегрузки и нарушения напряжения, автоматически управляя коммутационными аппаратами. На сегодняшний день отсутствует устройство РЗА, реализованное на аппаратной платформе с преимущественным применением отечественной элементной базы, в том числе отечественного микроконтроллера.

В работе проанализированы возможности отечественного микроконтроллера K5500BK018 (Комдив-МК) для реализации цифрового устройства РЗА. Высокая производительность, широкий набор интерфейсов UART, Ethernet, SPI, I²C и CAN позволяют реализовать многоканальную обработку сигналов, а также алгоритмы токовой, дифференциальной и дистанционной защиты.

Архитектура устройства включает внешние высокоточные АЦП, связанные через SPI-интерфейс с K5500BK018, дискретные выходы для управления вакуумными выключателями и разъединителями/заземлителями, а также опторазвязанные входы для приёма дискретных сигналов положения коммутационных аппаратов и сигналов блокировок. Внешние интерфейсы представлены следующим набором: UART (протокол ModBus RTU), Ethernet (протоколы МЭК 60870-5-104, SNTP).

Программная архитектура основана на RTOS с обработкой прерываний и задачами реального времени, что позволяет с необходимой дискретностью по времени реализовывать алгоритмы релейной защиты.

Использование отечественного МК K5500BK018 позволяет объединить измерительные, вычислительные и управляющие функции в одном устройстве, обеспечивая высокую надёжность, точность измерений и совместимость с промышленными протоколами, что делает устройство эффективным инструментом для повышения безопасности современных подстанций.

Литература

1. **Исмагилов Ф.Р., Ахматнабиев Ф.С.** Микропроцессорные устройства релейной защиты энергосистем: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. — Уфа: УГАТУ, 2009. — 171 с.

И.А. Романцов, студ.; рук. П.А. Рашитов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПИД-УПРАВЛЕНИЕ МИКРОКРИОГЕННОЙ СИСТЕМОЙ ФОТОПРИЁМНИКА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА K1986BE92QI

Современные фотоприёмные устройства, особенно работающие в среднем и дальнем ИК-диапазоне, требуют поддержания чувствительного элемента при строго заданной сверхнизкой температуре, так как её отклонения приводят к росту тёмного тока, шумов и снижению чувствительности. Поэтому актуальной задачей является создание компактной системы термостабилизации с автоматическим регулированием температуры на основе микрокриогенной системы и цифровых алгоритмов управления.

В работе рассматривается применение микроконтроллера K1986BE92QI для реализации цифрового ПИД-регулятора температуры фотоприёмника. Микроконтроллер на базе ARM Cortex-M3 со встроенными АЦП, таймерами и модулями ШИМ обеспечивает измерение сигнала термодатчика, его сравнение с опорным значением и вычисление управляющего воздействия ПИД-регулятора, формируемого в виде ШИМ-сигналов для исполнительных цепей.

Управление микрокриогенной системой осуществляется через исполнительный механизм, приводимый в действие безколлекторным электродвигателем. Коммутация фаз и регулирование мощности выполняются транзисторным мостом под управлением ШИМ-сигналов таймеров микроконтроллера, а программная часть системы включает реализацию ПИД-регулятора, обработку сигналов датчиков Холла и контроль аварийных режимов. Это обеспечивает работу в реальном времени и настройку параметров регулирования под конкретный фотоприёмник и криоохладитель.

Применение K1986BE92QI делает возможным создание компактного, энергоэффективного и технологичного устройства стабилизации температуры фотоприёмника. Использование ПИД-регулирования обеспечивает высокую точность поддержания температуры, что способствует повышению чувствительности и стабильности работы фотодетектора.

Литература

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004. — 400 с.
2. Микроконтроллеры серии 1986BE9х. Техническое описание. АО «ПКК Миландр». — 252 с.

Я.М. Широков, студ.; рук. И.Д. Добкин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Современные полупроводниковые преобразователи электроэнергии, являются ключевыми элементами в энергоснабжении критически важных объектов. К ним предъявляются высокие требования по качеству выходного напряжения, динамическому отклику и устойчивости к изменяющимся и нелинейным нагрузкам. Традиционные системы управления на основе ПИД-регуляторов не всегда обеспечивают требуемое качество переходных процессов при работе на нелинейную и изменяющуюся нагрузку [1].

В данной работе проводится сравнительное моделирование и анализ систем управления для преобразователя напряжения первого рода: на основе классического ПИД-регулятора и системы на основе нечеткой логики по методу Мамдани. Моделирование выполнено в среде Matlab Simulink. Нечеткий регулятор был разработан с использованием правил «ЕСЛИ-ТО», где входными переменными служили ошибка сигнала напряжения и ее производная. Для дефазификации использовался метод центра тяжести [1].

В данной работе проводится сравнительное моделирование и анализ систем управления для преобразователя напряжения первого рода: на основе классического ПИД-регулятора и системы на основе нечеткой логики по методу Мамдани. Моделирование выполнено в среде Matlab Simulink. Входными переменными нечеткого регулятора служили ошибка сигнала напряжения и ее производная. При проектировании нечеткого контроллера учитывались современные подходы к оптимизации параметров нечетких систем управления [2].

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о наличии характерных особенностей у каждого из рассмотренных подходов к управлению преобразователем. Полученные сравнительные характеристики могут быть использованы для выбора оптимальной структуры системы управления в зависимости от конкретных требований к полупроводниковому преобразователю.

Литература

1. **S. Abdelazim, A. Belal, A. Emary** Intelligent UPS Inverter Control Design Using Microcontroller // Journal of Energy Technologies and Policy. — 2014. Vol.4, No. 2. P. 34–47.
2. **K.S. Tang, Man K.F., Chen G., Kwong S.** An Optimal Fuzzy PID Controller // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2001. Vol. 48, No. 4. P. 757–765.

В.А. Козлов, асп.; рук. Д.А. Серегин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОПОДСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ДЛЯ АВТНОМНЫХ И СЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

На сегодняшний день, рассмотрен вопрос применения алгоритма автоподстройки параметров цифровой системы управления для автономного преобразователя [1]. В данном случае, присутствует один накопитель энергии в виде дросселя фильтра инвертора, что заметно упрощает алгоритм и не требует значительных вычислительных мощностей. Однако автономные и сетевые преобразователи могут иметь в своём составе фильтры и более высоких порядков, что приводит к усложнению алгоритмов управления на основе прогнозирования. В частности, при работе инвертора в режиме синхронизации с сетью для получения качественных переходных процессов при динамическом изменении целевых параметров возникает необходимость автоподстройки задаваемого значения индуктивности сети L_{line} , величину которой не всегда есть возможность определить с высокой точностью [2].

В работе представлено математическое описание оригинального алгоритма автоподстройки параметров системы управления с прогнозированием для автономных и сетевых преобразователей, а также результаты компьютерного моделирования алгоритма в системе Matlab Simulink. Основной задачей является вывод математических модели для реализации алгоритма автоподстройки в реальном времени параметров фильтра инвертора (ёмкости конденсаторов и индуктивности реакторов) для цифровой системы управления с прогнозированием.

При построении компьютерной модели алгоритма автоподстройки производится учёт особенностей работы цифровой системы управления, связанных с её дискретностью. Кроме того, при разработке алгоритма происходит учёт временных задержек измерения датчиков тока и напряжения, используемых для построения контуров обратной связи системы управления.

Литература

1. **Анучин А.С.** Прогнозирование сигнала обратной связи для ПИ-регулятора предельного быстродействия / А.С. Анучин // Электротехника. — 2014. — № 6. — С. 27–36.
2. **Серегин Д.А., Павлова М.С., Козлов В.А.** Алгоритм цифрового управления ведомым сетью инвертором с прогнозированием сигналов обратной связи // Силовая электроника. — 2025. — № 2(109). — С. 38–42.

А.Р. Родионов, асп.; рук. М.И. Петров, к.т.н. (НИУ «МАИ»)

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ $\pm 400\text{В DC}$ В ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Цель данной работы состоит в формализации принципов построения систем питания на основе архитектуры $\pm 400\text{В DC}$, а также в структурировании мирового опыта их применения в центрах обработки данных различного класса, включая инфраструктуру, ориентированную на задачи искусственного интеллекта.

Рост вычислительной мощности систем искусственного интеллекта сопровождается существенным увеличением плотности мощности и энергопотребления центров обработки данных (ЦОД). Современные стойки систем искусственного интеллекта потребляют до 100–200 кВт, что создаёт значительные токовые нагрузки в традиционных системах питания на 48 В DC. Такие архитектуры становятся ограничивающим фактором: возрастают потери на проводниках, усложняется теплоотвод и увеличивается объем проводов.

Одним из направлений повышения эффективности систем электроснабжения ЦОД рассматривается переход к архитектурам постоянного тока среднего уровня напряжения, в частности — к симметричной топологии $\pm 400\text{В DC}$ [1]. Повышение напряжения позволяет существенно снизить токи, уменьшить потери на проводах и оптимизировать габариты кабельных трасс. Вместе с тем внедрение таких решений связано с ростом требований к изоляции, безопасности и надежности элементов распределённой системы питания.

В рамках работы внимание уделяется аспектам построения систем $\pm 400\text{В}$, включая вопросы симметрии потенциалов, изоляции и выбора преобразователей. Для анализа планируется сравнительное рассмотрение нескольких архитектур — 48 В, +400 В, +800В и $\pm 400\text{В DC}$ — с оценкой токовых нагрузок, потерь мощности и массогабаритных характеристик.

Результаты позволят уточнить диапазоны рационального применения систем $\pm 400\text{В DC}$, а также выявить ключевые факторы, ограничивающие их внедрение в инфраструктуре центров обработки данных искусственного интеллекта.

Литература

1. **Zhaozheng Hou**, Huawei Digital Power, China — PCIM Asia Shanghai Conference 2025, September 2025.

М.М. Ковалев, студ., А.А. Газин, студ.;
рук. П.А. Рашитов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВА ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА КОМДИВ-МК

Для борьбы с гололедно-ветровыми авариями на ВЛ наиболее эффективны системы плавки гололеда, включающие в себя устройства плавки (УПГ) [1]. УПГ плавит гололед переменным током, регулируемым тиристорным ключом, состоящим из встречно-параллельно соединенных тиристорных сборок. СУ устройства должна осуществлять регулирование тока в проводах ВЛ, защиту от аварийных режимов, индикацию действующего тока и состояния.

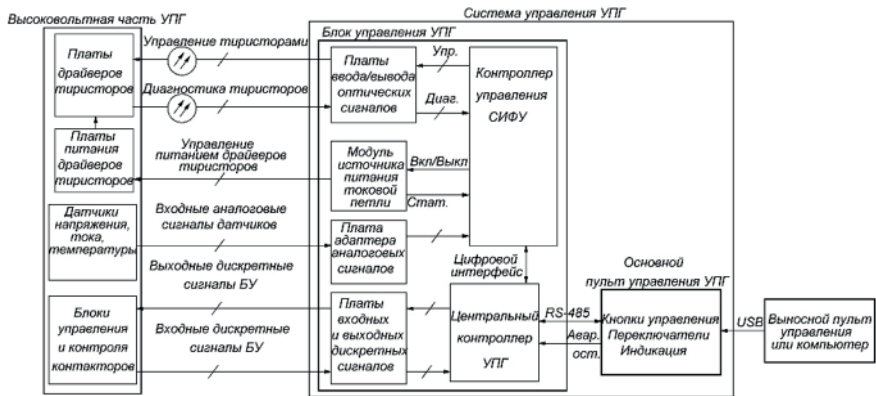


Рис. 1. Структурная схема УПГ

В работе рассмотрены возможности использования микроконтроллеров семейства Комдив-МК для технической реализации контроллера СИФУ, центрального контроллера и основного пульта управления УПГ. Применение микроконтроллеров Комдив-МК (K5500BK018) или, в случае контроллера СИФУ, Комдив-МКЭ позволит достичь технических требований с использованием отечественных компонентов, входящих в «Реестр промышленной продукции, произведенной на территории Российской Федерации», что соответствует политике замещения импорта.

Литература

1. Левченко И.И. [и др.] Интеллектуальная система плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи ПАО «МРСК Юга» / Левченко И.И. [и др.] // Электроника, электротехника, приборостроение и радиоэлектроника (ЭЭПИР). — 2018. — № 1(46). — С. 72–82.

М.С. Волонин, аспирант; рук. Д.А. Шевцов д.т.н. (МАИ, г. Москва)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ ВРЕМЕНИ

Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) является незаменимым функциональным узлом систем управления многих устройств преобразовательной техники, таких как корректоры коэффициента мощности или инверторы, работающие на сеть. Существуют различные способы построения блоков ФАПЧ, однако базовая структура всегда должна включать в себя три фундаментальных звена: фазовый детектор (ФД), корректирующее устройство (КУ) и генератор, управляемый напряжением (ГУН) [1].

Базовая настройка ФАПЧ подразумевает, что частота отслеживаемого напряжения изменяется незначительно, тогда подобная система будет устойчивой. В том случае, если существует необходимость расширить регулируемую способность на больший диапазон частот, в структуру ФАПЧ необходимо ввести звено, передаточная характеристика которого зависит от текущего отслеживаемого сигнала. Такого эффекта можно добиться путём переменных постоянных времени таких звеньев, этот эффект также называется адаптацией к входному сигналу, что делает отношения входа и выхода таких звеньев нелинейным. В результате этого при большом отклонении частоты входного сигнала обеспечивается быстрая подстройка, а когда отклонение снижается до достаточно малой величины, обеспечивается апериодическое окончание переходного процесса с минимальными колебаниями.

В силу систематизации знаний о системах ФАПЧ на основе нелинейных звеньев с переменными постоянными времени предлагается классификация по способу регулирования: по переходу входного сигнала через ноль или же по усреднённому значению. А также по месту внедрения адаптации: в ФД или в КУ.

В докладе будет рассмотрена работа блока ФАПЧ в структуре инвертора, работающего на сеть. Представлены результаты аналитического расчёта и имитационного компьютерного моделирования.

Литература

1. **Best, R.E.** Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications, 5th edition, New York: McGraw-Hill Professional, 2003.

В.А. Ионова, студ.; Д.А. Серегин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Ключевые слова: многоканальный ИВЭП, цифровое управление, распределённое питание, синхронизация каналов, защита, ШИМ, АЦП.

Современные телекоммуникационные, вычислительные и промышленные системы предъявляют повышенные требования к надёжности, гибкости и наблюдаемости вторичных источников питания с несколькими независимыми выходными каналами. Переход на цифровые алгоритмы управления предоставляет возможности динамической балансировки нагрузки, гибкой конфигурации режимов, централизованной диагностики и простому масштабированию системы [1].

В алгоритме реализованы:

- цифровые ПИ-регуляторы напряжения и ограничители тока с адаптивной настройкой коэффициентов;
- цепь вывода энергии индуктивности рассеяния;
- синхронизация переключения для уменьшения пульсаций и помех.

Моделирование в среде Matlab показало улучшение устойчивости при коммутациях нагрузки и снижение переходных перенапряжений при использовании цифровых адаптивных ПИ по сравнению с фиксированными аналоговыми решениями [2].

Работа представляет интегрированный подход к цифровому управлению многоканальными ИВЭП с акцентом на модульность, распределённость управления [3].

Цифровая система управления обеспечивает повышенную гибкость конфигурации, улучшенную надёжность и удобство диагностики многоканальных источников вторичного электропитания [4].

Литература

1. **Erickson R.W., Maksimovic D.** Fundamentals of Power Electronics. 2nd ed. Kluwer Academic/Plenum, 2001.
2. **Pressman A.I., Billings K., Morey T.** Switching Power Supply Design. 3rd ed. McGraw-Hill, 2009.
3. **Rashid M.H.** Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. 4th ed. Pearson, 2013.
4. **Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A.** Feedback Control of Dynamic Systems. 7th ed. Pearson, 2014.

*В.А. Мищенко, студент;
рук. А.Б. Лоскутов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Шаговый двигатель — это электромеханическое устройство, преобразующее цифровые электрические импульсы в поворот вала двигателя на определённый угол. Конструкция шагового двигателя позволяет использовать его в устройствах со строгими критериями к позиционированию и перемещению полезной нагрузки, по типу оптико-электронных и антенных систем.

Несмотря на это, у шаговых двигателей имеются значительные конструкторские недостатки, к которым относятся, низкий КПД, высокая температура работы и резонанс ротора. Использование эффективного управления с использованием преобразователей электрической энергии позволяет компенсировать эти недостатки.

Тем не менее, условия повышенной сложности эксплуатации предъявляют дополнительные требования к стабильной работе шаговых двигателей. К таким критериям относятся: внешние погодные условия (перепады температур, механические воздействия, повышенная влажность), работа от ограниченных источников питания, защита от электромагнитных помех и коротких замыканий.

Применение «устоявшихся» методов управления в данном случае не может обеспечить точность и эффективность работы двигателя. Для анализа вышеуказанных требований в докладе рассматриваются следующие предложения по совершенствованию управления шаговым двигателем:

1. Совершенствование алгоритмов управления с использованием датчиков окружающей среды и погодных моделей для компенсации задержек в управлении и самодиагностики состояния двигателя;
2. Использование нескольких режимов управления в зависимости от текущих внешних факторов и задач;
3. Применение схемных алгоритмов и фильтров для повышения устойчивости к внешним воздействиям на двигатель.

Это повысит надёжность шаговых двигателей, снизит их энергопотребление, увеличит срок службы оборудования и обеспечит возможность быстрого реагирования на изменяющиеся внешние воздействия в сложных условиях эксплуатации.

Секция 10

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Electronics and nanoelectronics

Председатель секции: к.т.н., доцент Зезин Денис Анатольевич

Секретарь секции: к.т.н., доцент Баринов Алексей Дмитриевич

В.Е. Киселева, студ.; рук. А.А. Афанасьев (НИУ «МЭИ»)

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА ТИПА «СТОХАСТИЧЕСКИЙ ДИФфуЗИОННЫЙ ДВИЖОК»

Роевой алгоритм — комплексная система, состоящая из большого количества одинаковых элементов, взаимодействующих между собой, работающая на подобии механизмов живой и не живой природы, биологических систем, к примеру: рой насекомых, птиц или капель воды [2], цель которого состоит в решении задач с высокой вычислительной сложностью, где классические алгоритмы работают неоправданно долго.

Роевой интеллект строится на системе, состоящей из множества агентов (боидов). Каждый боид следует простым правилам, а их коллективное разумное поведение возникает благодаря случайному взаимодействию, без единого управляющего центра [3]. Целью проекта являлась разработка цифровой схемы для поиска максимального значения в матрице 13х8, представленной в ПЗУ, с последующим выводом найденного числа и его координаты на семисегментный индикатор [1]. Схема основана на базовых логических элементах И-НЕ, построенных по технологии КМОП. Общее количество агентов (боидов) в схеме составило 7 и 2552 логических элементов в каждом, а для выполнения одного шага алгоритма требуется 3 такта.

В докладе обсуждается реализация роевого интеллекта на схмотехническом уровне, а также возможность применения данного подхода для решения более сложных задач оптимизации и распознавания образов, к примеру: определение точного цвета в изображении или идентификация объектов по заданным параметрам.

Литература

1. **Ануфриев Ю.В.** Цифровые автоматы. Лабораторные работы № 1–10: методическое пособие по курсу «Элементы микроэлектронных систем» для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника». — М.: Издательство МЭИ, 2015. — 40 с.
2. **Коцюбинская С.А.** Алгоритмы роевого интеллекта. Алгоритм роя частиц // Научный журнал. — 2020. — № 3–2. — С. 267–271.
3. **Карпенко А.П.** Популяционные алгоритмы оптимизации [Электронный ресурс]. — URL: <https://is.ifmo.ru/works/2012/karpenko-population-algorithms.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

*Д.А. Калиничев, студ.; Д.С. Черкезова, студ.;
рук. А.Д. Баринов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЁНОК, НАНЕСЁННЫХ НА ПОДЛОЖКИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Оптические свойства алмазоподобных зависят от условий изготовления, так как могут реализоваться разные структурные единицы, которые соответствуют разным кристаллическим модификациям углерода, то есть можно получить оптически прозрачные плёнки, плёнки с шириной запрещённой зоны близкой к нулю, а также промежуточные состояния [1]. Например, при исследовании плёнок DLC, нанесённых при различной мощности напыления, выяснилось, что коэффициент пропускания уменьшается при мощности напыления 400 Вт в сравнении с мощностью напыления 100 Вт [2]. Однако ранее не изучалось влияние подложки на оптические свойства алмазоподобных кремний-углеродных плёнок.

В данной работе рассматривались алмазоподобные кремний-углеродные плёнки, полученные плазмохимическим осаждением, нанесённые на подложки из ситалла, кремния, алюминия, кварца и нержавеющей стали. С помощью спектрофотометра измерялись коэффициенты пропускания и отражения алмазоподобных плёнок на подложках и подложек без нанесения плёнок в диапазоне длин волн от 400 до 3500 нм, коэффициент поглощения получен аналитически. Путём вычислений с помощью закона Бугера-Ламберта получены коэффициенты поглощения, пропускания и отражения алмазоподобных плёнок для исключения влияния оптических свойств подложек. Было замечено, что на определённых подложках при нанесении алмазоподобных плёнок коэффициент пропускания увеличивается.

В докладе будут представлены спектры поглощения, пропускания и отражения алмазоподобных плёнок, и различных подложек, а также наблюдение просветляющего эффекта за счёт нанесения алмазоподобных плёнок на различных подложках.

Литература

1. **Попов А.И.** Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. Пособие для вузов / А.И. Попов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 272 с.
2. **Xin Tan.** Микроструктура и оптические свойства алмазоподобных углеродных плёнок, нанесённых методом магнетронного распыления в видимом и инфракрасном диапазонах — *Diamond & Related Materials*, 2023. — 10 с.

*Д.А. Калиничев, студ.; Д.С. Черкезова, студ.;
рук. А.Д. Баринов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЁНОК

Кремний-углеродные алмазоподобные плёнки представляют собой перспективный материал для микро- и наноэлектроники благодаря своей высокой твёрдости, химической стойкости и регулируемой проводимости [1]. Высокая прочность и твёрдость плёнок связаны с сильными внутренними напряжениями, что является недостатком при попытке создания пленок толще 2 мкм вследствие ограниченной адгезии к подложке [2]. Актуальность исследования таких плёнок при низких температурах связана с развитием авиакосмических технологий и датчиков, работающих в экстремальных условиях, где стабильность электрических свойств имеет ключевую роль.

В данной работе рассматривались алмазоподобные кремний-углеродные плёнки, полученные плазмохимическим осаждением, нанесённые на подложки из кремния. Исследование проводилось при охлаждении образцов жидким азотом до температуры примерно 77 К. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) плёнок измерялись при постепенном изменении температуры. Температура оказывает непосредственное влияние на движение электронов, возможные переходы электронов по локализованным состояниям алмазоподобных пленок и, как следствие, на их электрофизические свойства.

В работе изучалась проводимость и энергия активации алмазоподобных плёнок в области низких температур. Это позволило определить влияние охлаждения на электрические свойства материала и сделать выводы о стабильности его электрофизических характеристик в экстремальных условиях.

Литература

1. **Пресняков М.Ю.** Структура и термостабильность пленок металлосодержащих кремний-углеродных нанокомпозитов: дис. Конд. Техн. Наук: 01.04.10. М. 2014 — 168 с.
2. **Попов А.И.** Физика и технология неупорядоченных полупроводников: учеб. Пособие для вузов / А.И. Попов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 272 с.

А.С. Каримов, студ.; рук. Ю.В. Ануфриев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО СВЧ-ТРАНЗИСТОРА С КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВОЙ БАЗОЙ

Современные биполярные транзисторы с гетеропереходами на основе кремний-германиевых (SiGe) структур представляют собой важный элемент высокочастотной электроники. Использование гетероперехода база–эмиттер позволяет значительно увеличить коэффициент усиления и рабочую частоту транзистора [1].

В настоящей работе проведено моделирование характеристик СВЧ транзистора с кремний — германиевой базой с применением САПР Synopsys TCAD Sentaurus (рис. 1).

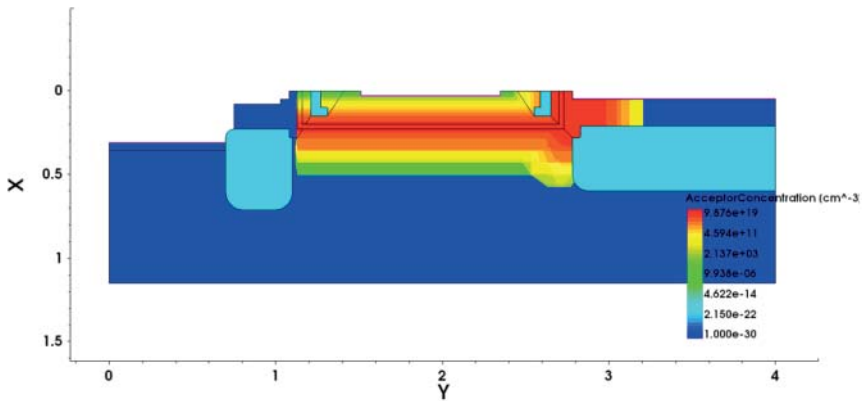


Рис. 1. Пример распределения акцепторной примеси в базе

Исходные данные для создания двумерной модели были получены с помощью микрофотографий структуры транзистора, выполненных с помощью электронной просвечивающей микроскопии. На их основе была восстановлена геометрия структуры в модуле SDE, распределение легирующих примесей в эмиттере, базе и коллекторе были выбраны методом подбора. В ходе численного эксперимента были получены входные, выходные характеристики транзистора и частотные характеристики [2].

В результате проводимых исследований была получена полнофункциональная модель транзистора, позволяющая контролировать влияние технологических параметров на характеристики конечного прибора.

Литература

1. Климов С.М. Физика и моделирование биполярных транзисторов. — М.: Радио и связь, 2010.
2. Synopsys Sentaurus Device User Guide. — Synopsys Inc., 2023.
3. Соколов П.В., Дьячков А.В. Гетероструктурные транзисторы для СВЧ-применений. — М.: Энергоатомиздат, 2018.

В.Ю. Орехов, студ.; рук. Ю.В. Ануфриев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

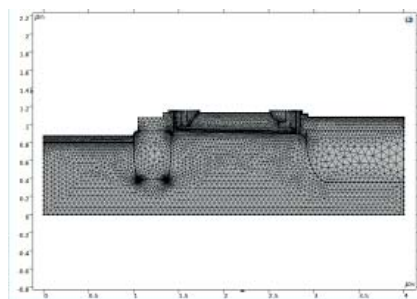
МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО СВЧ-ТРАНЗИСТОРА С КРЕМНИЙ — ГЕРМАНИЕВОЙ БАЗОЙ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ COMSOL MULTIPHYSICS

Применение современных программных пакетов физико-топологического моделирования позволяет не только получать данные о характеристиках приборов на этапе проектирования, но и исследовать воздействие внешних факторов на их работу.

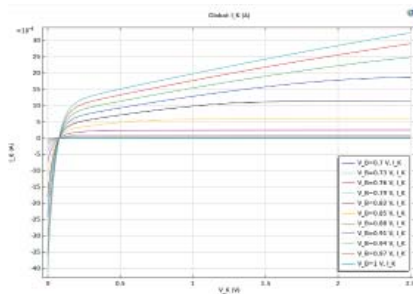
Основной целью данной работы является верификация технологических параметров, применяемых при изготовлении коммерчески доступного прибора и создание полнофункциональной модели.

В качестве объекта для исследования выступает один из сегментов современного биполярного транзистора с базовой областью на основе кремний-германия (SiGe).

В работе представлены результаты моделирования характеристик СВЧ-транзистора с применением программного обеспечения COMSOL MULTIPHYSICS (рис. 1).



(а)



(б)

Рис. 1. Результаты моделирования характеристик СВЧ-транзистора: (а) пример сетки на двумерной структуре транзистора; (б) семейство выходных характеристик

В результате моделирования были получены семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик, а также рассчитаны SPICE параметров для сравнения их с характеристиками реального прибора.

Литература

1. COMSOL Multiphysics User Guide. — COMSOL., 2012.
2. **Соколов П.В., Дьячков А.В.** Гетероструктурные транзисторы для СВЧ-применений. — М.: Энергоатомиздат, 2018.

Д.В. Воронцов, студ.; рук. А.Д. Баринов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АДАПТАЦИЯ ИГРЫ «ЗМЕЙКА» НА ПЛИС В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЯХ

Проектирование современных микросхем требует использования языков описания аппаратуры и знания базовых логических элементов цифровой схемотехники. Методология проектирования, представленная в книге [1], была применена для реализации классической игры «Змейка» без применения микроконтроллеров. Сгенерированный код на языке описания аппаратуры позволяет собрать схему как на базе логических микросхем малой степени интеграции, так и создать прошивку для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

В отличие от других реализаций, предложенный вариант является полностью аппаратной реализацией всех систем игры, включая логику формирования игрового пространства, движения и роста змейки, блок управления на основе джойстика, детектор столкновений и формирование видеосигнала для TFT-дисплея. Для повышения автономности игрового процесса реализован генератор псевдослучайных последовательностей, обеспечивающий квазислучайное появление цели на игровом поле. Такой подход обеспечивает глубокое понимание фундаментальных принципов цифровой схемотехники.

Осуществлена полная разработка устройства — от этапа системного проектирования до аппаратной реализации. Проведён синтез функциональных узлов системы. Выполнена задача интеграции отдельных модулей в единую систему, обеспечивающую целевое функционирование устройства. Также проведена верификация предложенных схемотехнических решений.

Разработанное устройство может быть использовано в курсах по цифровой схемотехнике и основам вычислительной техники как в школах и кружках робототехники, так и на младших курсах вузов. Данный проект служит наглядным пособием, демонстрирующим переход от абстрактной логической функции к реальному работающему устройству, и способствует популяризации инженерного образования среди молодёжи.

Литература

1. Харрис С.Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / пер. с англ. В.С. Яценкова, А.Ю. Романова; под редакцией А.Ю. Романова. / Харрис Д. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 810 с.: ил. — ISBN 978-5-97060-961-3

А.М. Наумова, студ.;

рук. С.В. Сидорова, к.т.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

ВНЕДРЕНИЕ ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА В ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ

В отличие от сплошных плёнок, в островковых плёнках, состоящих из островковых наноструктур (ОНС), квантовые размерные ограничения существуют по всем трём направлениям, расширяя область действия размерных эффектов. Использование ОНС в качестве чувствительного слоя в газовых сенсорах обусловлено уменьшением габаритных размеров, сокращением их энергопотребления, увеличением чувствительности из-за меняющейся проводимости структур под воздействием внешних условий, благодаря увеличению развитости поверхности [1]. Важной характеристикой являются размеры ОНС и расстояние между ними.

Цель работы — отработать режимы получения геометрических параметров островковых тонких пленок и наноструктур серебра.

Для формирования чувствительного слоя газового сенсора применяются как оксиды (ZnO , TiO_2 , WO_3 , CuO , SnO_2 , NiO , Co_3O_4), так и драгоценные металлы (Ag , Au , Pt).

Формирование островкового слоя серебра проводят методом термического испарения. На базе вакуумной установки MBTU11-1МС, расположенной на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им.Н.Э.Баумана, с использованием пикоамперметра организован стенд контроля начальных стадий роста тонкопленочных покрытий [2]. По кривым туннельного тока, протекающего по диэлектрической подложке в процессе нанесения покрытий, отработаны режимы формирования ОНС.

Геометрические параметры ОНС серебра измерены на атомно-силовом и сканирующем электронном микроскопах. Полученные изображения обработаны в программе графического анализа, на основании результатов которого построены зависимости геометрических размеров и морфологии ОНС серебра от режимов их формирования.

В дальнейшем планируется исследование чувствительности слоев ОНС к газовым средам.

Литература

1. **Сидорова С.В. и др.** Исследование свойств металлических островковых тонких пленок для применения в изделиях наноэлектроники [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://vacuum.org.ru/proceedings/vacuum-2022/4461/?ysclid=m34i5r9ctd712656560> (дата обращения: 23.11.2025).
2. **Нестеров С.Б.** Десять лучших инновационных продуктов выставки VacuumTechexpo 2016 [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/7/article_7639_547.pdf?ysclid=m34hkpphd240724435 (дата обращения: 23.11.2025).

А.А. Пухов, студ.; рук. А.О. Якубов, к.т.н. (НИУ «МИЭТ», Москва)

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК СОЕДИНЕНИЯ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Фазопеременные материалы [1, 2] представляют собой соединения с устойчивыми фазовыми состояниями — аморфное и кристаллическое, а благодаря высокому контрасту оптических и электрофизических свойств между данными состояниями, данный класс материалов является интересным для использования в оптической и электрической памяти, а также в перспективных интегрально-оптических устройствах. Интересным для использования в фотонных устройствах является соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST2241) [1, 2]. Целью данной работы являлась отработка технологии нанесения тонких плёнок GSST2241 методом магнетронного распыления и определение оптимальных режимов осаждения.

Отработка технологии осаждения осуществлялась на установке магнетронного распыления МВУ ТМ МАГНА и заключалась в варьировании изменения давления рабочего газа в камере при распылении (в диапазоне 0,1–0,9 Па) и подаваемой мощности на мишень (25–100 Вт). Тонкие пленки формировались на кремниевые и окисленные кремниевые подложки. Оптимальный режим нанесения определялся по результатам исследования элементного состава, толщины и температурных зависимостей удельного сопротивления. Для измерения электрофизических параметров использовались подложки со сформированными электродами.

В результате работы было установлено, что использование данных режимов позволяет получать тонкие пленки с составом близким к стехиометрическому GSST2241, а увеличение мощности приводит к росту скорости осаждения.

Исследования проводились в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).

Литература

1. Zhang Y., Chou J.B. et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics // Nature Communications. — 2019. — V. 10. — P. 4279.
2. Prabhathan P., Sreekanth, K.V. et al. Roadmap for phase change materials in photonics and beyond // Iscience. — 2023. — V. 26. — №. 10.

И.И. Долотов, студ.;

рук. Л.А. Зинченко, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Современные высоконагруженные цифровые элементы предъявляют жёсткие требования к обеспечению питанием, которые становится сложно выполнять в системах с значительной плотностью размещения компонентов и большим числом вычислительных компонентов [1].

В работе была определена методика проектирования систем питания высоконагруженных цифровых компонентов, учитывающая предъявляемые к электропитанию характеристики, расположение компонентов, их тепловые параметры, электромагнитную совместимость и технологические ограничения [2].

Была разработана единая методика последовательности проектирования систем питания для высоконагруженных систем питания. Она состоит из следующих ключевых пунктов: определение требований и ограничений; определение архитектуры системы питания; моделирование эффективности работы на уровне схемы; получение тепловых характеристик; разработка топологии с учетом накладываемых требований и ограничений; комплексное моделирование и проверка

Для этого проведено моделирование типовых систем обеспечения питания с различными параметрами. Анализируемыми параметрами являлись статическое падение напряжения, тепловой режим, импеданс системы на различных частотах, электромагнитная совместимость и технологические ограничения. Единой рекомендацией является стремление к уменьшению импеданса, размещению источников питания и развязывающих конденсаторов как можно ближе к нагрузке, отдаление элементов, имеющих значительное тепловыделение, и избегание создания узких мест на всех этапах обеспечения питанием компонентов.

Получены количественные оценки изменений по ключевым метрикам. Новизна работы заключается в выведении последовательного интегрального подхода в проектировании систем питания.

Практическая значимость состоит в возможности дальнейшего внедрения в системы автоматического проектирования, стандартизации подхода и улучшении промышленной применимости.

Литература

1. **Ramo, S.** Fields and waves in communication electronics / Simon Ramo, John R. Whinnery, Theodore Van Duzer. — 3rd ed. — John Wiley&Sons, Inc., 1994.
2. **Кечиев Л.Н.** Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. — М.: Грифон, 2016.

Л.А. Эль-Хадж, студ.; рук. Д.Ю. Терехов (НИУ МИЭТ, Зеленоград)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКООМНЫХ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ФАЗОПЕРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фазоперемennые материалы (ФПМ) активно используются в ячейках энерго-независимой фазовой памяти [1–3]. Для оптимизации структур ячеек электрического запоминающего устройства необходимо комплексное исследование свойств тонкопленочных ФПМ. Целью работы является исследование электрофизических и термоэлектрических свойств высокоомных тонких пленок фазоперемennых материалов $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ag}_4\text{In}_3\text{Sb}_{67}\text{Te}_{26}$ в широких диапазонах температур и напряженностей электрического поля.

В настоящей работе спроектированы конструкции, отработаны различные технологические маршруты с применением литографических и безлитографических методов и изготовлены образцы планарного и вертикального типа, обеспечившие возможность проведения исследований электрофизических и термоэлектрических свойств тонких пленок ФПМ в диапазоне напряженностей электрического поля от 10^1 до $5 \cdot 10^5$ В/см и температурах от -150 до 400 °С.

Определено, что слои данных материалов обладают тремя различными диапазонами изменения плотности тока от напряженности электрического поля. Электрическое переключение пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ag}_4\text{In}_3\text{Sb}_{67}\text{Te}_{26}$ из высокоомного в низкоомное состояние происходит при достижении пороговой напряженности $2,1 \cdot 10^5$ и $5,6 \cdot 10^4$ В/см соответственно. Показано, что достичь значения пороговой напряженности в тонких пленках ФПМ возможно только с использованием вертикальных структур.

Сравнение свойств тонких плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ag}_4\text{In}_3\text{Sb}_{67}\text{Te}_{26}$ показало, что материал $\text{Ag}_4\text{In}_3\text{Sb}_{67}\text{Te}_{26}$ требует меньших напряжений и времени записи/стирания, что перспективно для энергоэффективной памяти. В то же время $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ более пригоден для многоуровневого хранения данных и нейроморфных вычислений благодаря широкому интервалу фазового перехода.

Литература

1. **Kozyukhin S.A.** Phase change memory materials and their applications // Russian Chemical Reviews. 2022. Vol. 91, № 9. P. 1–39.
2. **Seltzer M.** An NVM Carol: Visions of NVM past, present and future // IEEE 34th International Conference on Data Engineering. 2018. P. 15–23
3. **Yang W.** Heterogeneously structured phase-change materials and memory // Journal of Applied Physics. 2021. T. 129. №. 5.

*М.Ю. Прудникова, студ., Д.Д. Бутманов, асп.; Д.А. Дронова, к.т.н.;
Д.В. Новиков м.н.с; рук. Т.П. Савчук, м.н.с. (НИУ МИЭТ)*

ЗАВИСИМОСТЬ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОТРУБОК АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ультрафиолетовые фотодетекторы востребованы в экологическом мониторинге и военных технологиях. Традиционные фотодиоды обладают высокой эффективностью, но требуют оптических фильтров для селективности, тогда как фоторезисторы проще конструктивно, но имеют низкое быстродействие и высокий темновой ток. Потенциальным решением, может является использование наноструктур широкозонного оксида титана, чувствительного к излучению короче 390 нм.

В свою очередь массивы нанотрубок анодного оксида титана обладают высокой удельной площадью поверхности, что способствует повышению фоточувствительности, а метод формирования — анодирование — позволяет производить контроль химического состава. Однако, в настоящий момент однозначных рекомендаций в этой области не сформулировано.

В настоящей работе проводилось исследование влияния температуры электролита при синтезе (от -5 до 40 °С) и последующей термической обработки (от 350–500 °С) на фотоактивность материала. Фазовый состав исследовали методами рентгенофазового анализа и комбинационного рассеяния света, морфологию образцов — с помощью растровой электронной микроскопии. Оптические свойства образцов исследовались методом диффузионного отражения света с последующим определением оптической ширины запрещенной зоны. Фотоактивность образцов оценивали по величине фототока в трех-электродной электрохимической ячейке при освещении светом ксеноновой лампы с использованием двух фотофильтров. Воспроизводимость оценки фотоактивности обеспечивалась применением калиброванного кремниевоего фотодиода. Полученные в ходе работы результаты будут полезны для дальнейшей разработки фотодетекторов на основе массивов нанотрубок оксида титана.

Литература

1. **Szaniawska-Białas E. et al.** Recent Advances in Preparation, Modification, and Application of Free-Standing and Flow-Through Anodic TiO₂ Nanotube Membranes // *Molecules*. — 2024. — Т. 29. — №. 23. — С. 5638.

Секция 11

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Biomedical Electronics

Председатель секции: д.т.н., доцент Крамм Михаил Николаевич

Секретарь секции: к.т.н. Стрелков Николай Олегович

Соорганизатором секции выступает Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».



**ЦЕНТР ДИАГНОСТИКИ
И ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ**

*М.Д. Шумакова, студ.;
рук. Н.О. Стрелков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ РЕОГРАММЫ

Анализ реографических кривых занимает особое место в современной медицинской диагностике и физиологических исследованиях, предоставляя ценную информацию о функциональном статусе сосудистой системы и позволяя выявлять различные патологические изменения. Особую значимость данное направление приобретает в контексте возрастающей потребности в безопасных и информативных методах диагностики, что особенно актуально в условиях неуклонного роста распространённости сердечно-сосудистой патологии [1].

В рамках работы был реализован алгоритм обработки реограммы в среде MATLAB. Входными данными для алгоритма послужили реографические сигналы пациентов в сидячем положении.

Реализованный алгоритм включает в себя этап предварительной фильтрации сигнала на основе вейвлет-преобразования, автоматическое выделение информативных параметров, таких как локальные пики минимумов и максимумов сигнала, показанных на рис. 1, и количественную оценку диагностически значимых показателей. Оцениваются такие показатели, как начальный сегмент реографической кривой — анакрота, нисходящий сегмент кривой — катакрота, и длительность сердечного цикла, после чего следует вывод полученных данных с последующим сохранением.

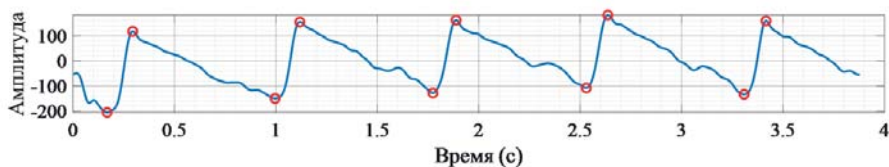


Рис. 1. Результат фильтрации и нахождения локальных пиков реограммы

В будущем данный алгоритм может применяться в обучающих целях для наглядной демонстрации всех этапов обработки и интерпретации показателей биомедицинских сигналов.

Литература

1. Алдонин Г.М. Системы и устройства в кардиологии: учебное пособие / Г.М. Алдонин, С.П. Желудько. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. — 181 с.

*Е.А. Зайцева, студ. (НИЯУ МИФИ);
рук. А.В. Петряйкин, д.м.н., доцент, главный научный сотрудник
(ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

РАЗРАБОТКА АНТРОПОМОРФНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ ИИ-СЕРВИСОВ ОЦЕНКИ КОСТНОГО ВОЗРАСТА

Методики оценки костного возраста играют ключевую роль в диагностике заболеваний, связанных с нарушениями роста и развития [1]. В условиях растущего интереса к применению технологий искусственного интеллекта особенно актуальна разработка новых автоматизированных решений для оценки костного возраста [2]. Антропоморфная модель кисти может решить ключевую проблему валидации ИИ-сервисов — отсутствие объективного эталона с заранее известными параметрами, что позволит проводить независимое тестирование алгоритмов в контролируемых условиях.

Целью настоящего исследования является разработка антропоморфных моделей дистального отдела верхней конечности (кисти), соответствующих разным возрастным категориям (6 категорий от 0 до 19 лет), для проведения валидации ИИ-сервисов по оценке костного возраста. Чертежи мягких тканей и скелета кисти получены из анонимизированных DICOM файлов рентгенограмм кисти в прямой проекции здоровых детей и подростков. Модель состоит из двух слоёв различной рентгеновской плотности: пластина из полиметилметакрилата, имитирующего мягкие ткани, с углублениями под кости, которые заполняются материалом для имитации костной ткани с заданными параметрами поглощения рентгеновского излучения (1200 единиц Хаунсфилда при анодном напряжении на рентгеновской трубке 120 кВ по данным компьютерной томографии) [3].

Литература

1. **Резников Д.Н. и др.** Определение костного возраста по данным рентгенографии кисти: от классических методик к искусственному интеллекту (научный обзор) // Digital Diagnostics. 2025. Т. 6, № 2. С. 302–316.
2. **Резников Д.Н. и др.** Применение искусственного интеллекта для оценки костного возраста в Российской медицине: опыт хакатона (итоги разработки алгоритмов для медицинской диагностики). Журнал Диагностическая и интервенционная радиология. 2024; 18(5); 6–14.
3. **Черкасская М.В. и др.** Фантомное моделирование поясничного отдела позвоночника для КТ денситометрии и двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. — Радиология — 2025: XIX Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «МЕДИ Экспо», 2025. — С. 168–169.

*В.А. Лукина, студ. (НИЯУ МИФИ);
рук. А.В. Петряйкин, д.м.н., доцент, главный научный сотрудник
(ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОМОРФНОЙ МОДЕЛИ ПРОКСИМАЛЬНОГО ОТДЕЛА БЕДРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОСТЕОДЕНСИТОМЕТРИИ

Остеопороз является широко распространенным заболеванием скелета, характеризующимся снижением костной массы и нарушением микроархитектоники костной ткани, что приводит к повышению риска переломов. Для своевременной диагностики остеопороза применяют двухэнергетическую рентгеновскую абсорбциометрию (ДРА) и количественную компьютерную томографию (ККТ) [1]. Оценка точности денситометрических исследований, включающая такие показатели, как относительная погрешность и воспроизводимость, а также необходимость кросс-калибровки различных денситометрических сканеров, обуславливает актуальность работ, посвященных анализу точности остеоденситометрических исследований [2]. Целью работы является разработка антропоморфной модели проксимального отдела бедра с заданными количественными характеристиками для калибровки и оценки точности денситометрических исследований (ККТ и ДРА). При создании модели использованы материалы, имитирующие рентгеновскую плотность кортикального и губчатого вещества. По данным (КТ) значение рентгеновской плотности кортикального слоя модели составляет 1200 HU (при максимальной энергии рентгеновского излучения на трубке 120 кэВ), губчатого вещества — 110 HU [3]. Модель включает в себя кость бедра и таза, что обеспечивает анатомическую достоверность. Конструкция предусматривает возможность ротации бедра, что позволяет воспроизводить различные клинические случаи и проводить исследования в условиях, максимально приближенных к реальным.

Литература

1. **Белая Ж.Е. и др.** Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза. Остеопороз и остеопатии. 2021; 24(2):4–47. <https://doi.org/10.14341/osteo12930>.
2. **А.В. Петряйкин и др.,** “Оценка точности денситометрических исследований. Применение фантома РСК ФК2,” Травматология И Ортопедия России, vol. 25, pp. 124–134, 2019, doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-3-124-134
3. **Черкасская М.В. и др.** Фантомное моделирование поясничного отдела позвоночника для КТ денситометрии и двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. — Радиология — 2025: XIX Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «МЕДИ Экспо», 2025. — С. 168–169.

*Ю.В. Булгакова, асп.; рук. Д.В. Леонов, к.т.н., в.н.с.
(НИУ «МЭИ», ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРЕНИРОВОЧНОГО ФАНТОМА

Создание фантомов для обучения навыкам регионарной анестезии необходимо для лучшего усвоения теоретического материала и повышения успешности выполнения процедуры при использовании УЗ-навигации на 25% [1]. Чтобы максимально близко воспроизвести человеческие ткани, часто используется агар-агар, желатин и куриное мясо, которые, однако, подвержены высыханию, негигиеничны [2]. Тогда как синтезированные материалы, например, полимеры, позволяют избежать перечисленных недостатков. Однако акустические характеристики подобных материалов изучены не полностью.

Основные измерения затухания и скорости распространения звука в созданных материалах проводились на частотах в диапазоне 1–5 МГц с помощью осциллографа. Критерии выбора материалов основаны на сопоставимости эхогенности и способности воспроизводить акустические свойства тканей человека. В работе представлены результаты измерений акустических характеристик материалов, сопоставимых с параметрами тканей человека, а именно, мягких, жировых, мышечных, а также нервов, сосудов, мозга и кожи, которые применимы для моделирования. На основе разработанных и изученных материалов возможно создание фантомов для обучения навыкам ультразвуковой визуализации [3–5].

Результаты исследования могут представлять интерес для учёных, занимающихся взаимодействием ультразвуковых полей с биообъектами, а также для врачей, заинтересованных в практическом обучении навыкам проведения процедур под ультразвуковым контролем.

Литература

1. **Булгакова Ю.В. и др.** Фантом сосудов с нервами для ультразвуковой диагностики // Медицинская техника. 2025. № 3. С. 50–52.
2. **Булгакова Ю.В., Леонов Д.В., Омелянская О.В., Васильев Ю.А.** Материалы для имитации характеристик крови, стенок сосудов и окружающих тканей при ультразвуковой визуализации // Медицина и высокие технологии. 2025. № 2. С. 20–27.
3. **Grebennikova V. et al.** Design and validation of a technology for 3D printing training phantoms for ultrasound imaging. *Phys Eng Sci Med* (2025). <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01670-7>.
4. **Леонов Д.В., Кульберг Н.С., Насибуллина А.А.** Фантом для ультразвуковых исследований // Патент на полезную модель RU 211266 U1, 27.05.2022.
5. **Leonov D. et al.** Design and evaluation of an anthropomorphic neck phantom for improved ultrasound diagnostics of thyroid gland tumors. *Int J CARS* 19, 1637–1645 (2024).

*А.Ю. Аكوпова, студ.; рук. Д.В. Леонов, к.т.н., в.н.с.
(НИУ «МЭИ», ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ФАНТОМА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Методы медицинской визуализации, такие как ультразвуковое исследование и магнитно-резонансная томография, являются ключевыми для раннего выявления патологий щитовидной железы. В Российской Федерации заболевания щитовидной железы широко распространены, при этом средний показатель заболеваемости диффузным эндемическим зобом по стране составляет 31%, а в отдельных регионах достигает 70% [1].

Фантом щитовидной железы, имитирующий структуру и свойства тканей, является важным инструментом для отработки диагностических навыков специалистами. Он позволяет повысить качество выявления различных патологий этого органа. Разработка мультимодального фантома, совместимого с МРТ и УЗИ, представляет собой сложную задачу, требующую комплексного подхода. Необходимо точно воспроизвести физические и биологические свойства тканей, стремясь к максимально реалистичной имитации тканей для обеспечения достоверности результатов обеих методов визуализации [2].

Использование обеих технологий особенно важно, поскольку оно позволяет одновременно и более точно диагностировать широкий спектр патологий щитовидной железы, объединяя преимущества каждого из методов. Для создания фантома применяются специальные материалы, имитирующие мягкие ткани и возможные структурные включения, встречающиеся в щитовидной железе [3–5]. В целом, создание мультимодального фантома щитовидной железы имеет большое значение для специалистов в области лучевой диагностики.

Литература

1. **Абдулхабирова Ф.М., Безлепкина О.Б., Бровин Д.Н. и др.** Заболевания и состояния, связанные с дефицитом йода // Проблемы эндокринологии. 2021. 67(3):10–25.
2. **Тимофеева Л.А., Диомидова В.Н., Воропаева Л.А. и др.** Сравнение диагностической ценности лучевых методов визуализации при узловых образованиях щитовидной железы // Медицинский альманах. 2012. 23(4):120–123.
3. **Леонов Д.В., Кульберг Н.С., Насибуллина А.А.** Фантом для ультразвуковых исследований // Патент на полезную модель RU 211266 U1, 27.05.2022.
4. **Grebennikova V., Leonov D., Zhou Z. et al.** Design and validation of a technology for 3D printing training phantoms for ultrasound imaging. *Phys Eng Sci Med* (2025). <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01670-7>
5. **Leonov D., Nasibullina A., Grebennikova V. et al.** Design and evaluation of an anthropomorphic neck phantom for improved ultrasound diagnostics of thyroid gland tumors. *Int J CARS* 19, 1637–1645 (2024).

*А.И. Чистова, студ.; рук. Д.В. Леонов, к.т.н., в.н.с.
(НИУ «МЭИ», ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

РАЗРАБОТКА КАЛИБРОВОЧНОГО ФАНТОМА ДЛЯ ПОВЕРКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

С 2011 по 2021 число ультразвуковых исследований увеличилось на 55% [1]. Это объясняется тенденцией бережного отношения к здоровью за счет прохождения медицинских осмотров, а также доступностью, информативностью и безопасностью ультразвукового исследования. Для отображения корректных данных ультразвуковые сканеры нуждаются в правильной настройке и поверке [2]. Для этого применяют калибровочные фантомы, представляющие собой искусственную модель, имитирующую структуру и акустические свойства человеческих тканей с известными характеристиками. Наиболее известными производителями калибровочных фантомов являются фирмы CIRS и Kyoto Kagaku, однако представленные ими модели имеют определенные недостатки: ограниченный срок использования высокая стоимость, трудности поставки в РФ.

Данная работа посвящена разработке и исследованию фантома для калибровки ультразвукового сканера. Фантом ориентирован на использование с линейным датчиком. Корпус имеет размер $9 \times 6 \times 8$ см³, вырезан из оргстекла толщиной 1 см, в нем есть ряд отверстий для пропускания струны толщиной 0,23 мм, а также крепежи для фиксаторов струн. Натянутые струны располагаются на расстоянии 1 см друг от друга и четко отображаются на экране ультразвукового сканера. Фантом предназначен для получения изображений в серошкальном режиме и заполнен тканеимитирующим материалом с рассеивателями, формирующими однородную спекл-картину [3, 4].

Разработанный фантом предназначен для использования в качестве калибровочного инструмента, но также может применяться для обучения [5].

Литература

1. **Won D., Walker J., Horowitz R. et al.** Sound the Alarm: The Sonographer Shortage Is Echoing Across. Healthcare. J Ultrasound Med. 2024;43(7):1289–1301.
2. **Wu C., Fu T., Chen X. et al.** Automatic spatial calibration of freehand ultrasound probe with a multilayer N-wire phantom. Ultrasonics. 2023;128:106862.
3. **Grebennikova V. et al.** Design and validation of a technology for 3D printing training phantoms for ultrasound imaging. Phys Eng Sci Med (2025). <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01670-7>.
4. **Леонов Д.В., Кульберг Н.С., Насибуллина А.А.** Фантом для ультразвуковых исследований // Патент на полезную модель RU 211266 U1, 27.05.2022.
5. **Насибуллина А.А., Лейченко Д.В., Суслина Л.А., Леонов Д.В.** Обучающие фантомы для ультразвуковой диагностики// Виртуальные технологии в медицине. 2022. № 3 (33). С. 252–254.

*А.А. Дьякова, студ.; рук. Д.В. Леонов, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

ИИ-АССИСТЕНТ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЙ ЖЕНСКОГО МАЛОГО ТАЗА

Заболевания органов малого таза у женщин представляют серьезную проблему. Миомы матки выявляются у 20–50% женщин репродуктивного возраста, а функциональные кисты яичников — у каждой пятой [1]. В 2022 году во всем мире было зарегистрировано около 313 тысяч новых случаев рака яичников и 142 тысяч новых случаев рака мочевого пузыря [2]. Ультразвуковое исследование остается основным методом диагностики, однако точность интерпретации изображений зависит от опыта специалиста [3]. Разработка системы автоматической диагностики на основе искусственного интеллекта позволит стандартизировать диагностический процесс и повысить точность выявления заболеваний.

Цель работы: разработка системы искусственного интеллекта для автоматического анализа ультразвуковых изображений малого таза, решающей две задачи: семантическую сегментацию областей интереса и классификацию заболеваний на основе сверточных нейронных сетей.

Для создания системы использовалась база ультразвуковых изображений с подтвержденными диагнозами и соответствующими разметками. Была разработана архитектура, в рамках которой модель U-Net решает задачу семантической сегментации, а модель ResNet50 — задачу классификации патологий [4]. Обучение проводилось на размеченных данных с применением аугментации для увеличения разнообразия обучающей выборки и повышения устойчивости моделей.

Таким образом, разработанный алгоритм может быть использован в качестве ассистента для повышения точности и скорости диагностики. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение перечня диагностируемых заболеваний и улучшение точности работы системы.

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. — Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. — 2022. — 252 с.
2. **Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I. et al.** Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin* 2018;68(6): 394–424. DOI: 10.3322/caac.21492
3. **Насибуллина А.А., Лейченко Д.В., Суслина Л.А., Леонов Д.В.** Обучающие фантомы для ультразвуковой диагностики // *Виртуальные технологии в медицине*. 2022. № 3 (33). С. 252–254.
4. **Ronneberger O. et al.** U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // *MICCAI*. 2015. P. 234–241.

*А.И. Терзи, А.Д. Серов, студ.; рук. Д.В. Леонов, к.т.н., доц.
(МИРЭА, НИУ «МЭИ», ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва)*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В МЕДИЦИНЕ

На интерес к этой теме указывает рост количества исследований в области применения дополненной реальности (AR) в медицине с 2015 по 2021 г. с 17 до 51 статей в год [1], а за период с 2018 по 2023 г. было опубликовано более 250 статей на эту тему [2]. С помощью AR-очков можно выполнить разметку перед хирургической операцией, улучшив пространственную координацию врача [3]. Не менее интересен симбиоз технологий дополненной реальности и медицинских фантомов, который является эффективным для симуляций и многократного тестирования различных процедур [4–6]. Существующие обзоры применения AR сосредотачиваются на конкретных областях медицины, при этом роль фантомов в них освещена недостаточно. Цель работы заключается в анализе влияния симбиоза AR и фантомов на медицину, основываясь на статистически значимых результатах.

Исследовались публикации на английском языке, представленные в базе данных PubMed в период с 2023 по 2025 г. Поиск выполнялся с использованием ключевых слов «augmented reality», «medicine», «phantom». Основное внимание уделялось тем статьям, где проводились эксперименты с количественной оценкой эффективности AR.

Данный обзор может быть интересен медицинским работникам, а также разработчикам приложений AR, студентам медицинских и технических направлений.

Литература

1. **Asoodar M., Janesarvatan F., Yu H., Jong N.** Theoretical foundations and implications of augmented reality, virtual reality, and mixed reality for immersive learning in health professions education // *Advances in Simulation*. 2024. 9(1):36
2. **Permana A., Lukito A.** Bibliometric Analysis of Augmented Reality Research in Medicine // *West Science Interdisciplinary Studies*. 2024. Vol. 02, № 01. PP. 07–10.
3. **Berger M., Winter R., Tuca A., et al.** Workflow assessment of an AR application for planning of perforator flaps in plastic reconstructive surgery: Game or game changer? // *Digital Health*. 2023. Vol. 9. PP. 1–11.
4. **Leonov D., Nasibullina A., Grebennikova V. et al.** Design and evaluation of an anthropomorphic neck phantom for improved ultrasound diagnostics of thyroid gland tumors. *Int J CARS* 19, 1637–1645 (2024).
5. **Jagoda P. et al.** Effectiveness of a brief teaching scenario in a phantom-based learning model for students to achieve ultrasound-guided vascular access — a prospective study // *Indian Journal of Surgery*. 2023. 85(Suppl 1): S234–S240.
6. **Grebennikova V. et al.** Design and validation of a technology for 3D printing training phantoms for ultrasound imaging. *Phys Eng Sci Med* (2025). <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01670-7>.

*А.А. Анненкова, студ.;
рук. Н.О. Стрелков, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ПУЛЬСОКСИМЕТР С BLUETOOTH

Современные медицинские технологии и системы интернета вещей открывают новые возможности для мониторинга здоровья, что особенно актуально в условиях роста спроса на домашние диагностические приборы. Одним из ключевых показателей, позволяющих оценить уровень оксигенации крови и функцию сердечно-сосудистой системы, является сатурация (SpO_2). Непрерывный контроль этого параметра, наряду с частотой пульса, важен для домашнего наблюдения, занятий спортом и телемедицины [1].

В настоящей работе рассматривается разработка беспроводного пульсоксиметра с передачей данных по Bluetooth для неинвазивного измерения сатурации (SpO_2) и частоты сердечных сокращений. Разрабатываемое устройство основано на принципе фотоплетизмографии с использованием датчика с двумя светодиодами (красный и инфракрасный) и фотодетектора [2], построено по схеме, представленной на рисунке ниже. Измеренные данные передаются посредством Bluetooth-модуля на внешнее устройство (смартфон или ПК) для визуализации и дальнейшего анализа в режиме реального времени.



Рис. 1. Структурная схема проектируемого пульсоксиметра

В результате работы был проведён анализ существующих методов пульсоксиметрии, разработан прототип автономного устройства и программное обеспечение для обработки сигналов и отображения данных. Получившийся прибор корректно измеряет SpO_2 и частоту сердечных сокращений, выводя данные на встроенный OLED-дисплей и передавая их на смартфон или ПК через Bluetooth-соединение.

Литература

1. Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. — М.: Радио и связь, 2013. — 250 с.
2. Дерябин Е.И., Двинянинова Е.Е., Ваганова Н.В., В.Ю. Осипов, А.П. Терещенко, А.Г. Дерябина Применение фотоплетизмографии для исследования локального кровотока челюстно-лицевой области Лазерная медицина 3(2) 1999 г.

*Ф.М. Килимник, студ.;
рук. Д.А. Балакин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА СТЕНДА И ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ МАГНИТНОЙ НАВИГАЦИИ ВНУТРИСЕРДЕЧНЫХ КАТЕТЕРОВ

Магнитная навигация катетера используется для определения положения диагностического катетера внутри сердца. Точность работы навигационной системы зависит от правильной калибровки магнитной рамки и датчиков, которые измеряют магнитное поле и позволяют вычислять координаты катетера.

В работе был разработан калибровочный стенд с фиксированной геометрией, предназначенный для проверки точности позиционирования катетера. В состав стенда входят индуктивный датчик B824, корпус для его установки и усилительная плата на базе операционных усилителей AD8544.

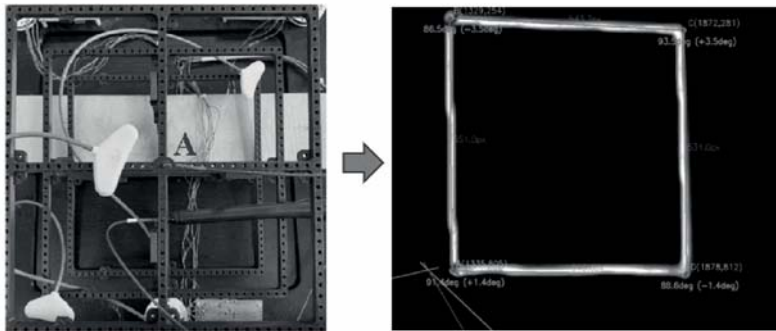


Рис. 1. Сопоставление реального расположения катетера (А-В-С-Д) с реконструированной траекторией в системе навигации

На основе аппаратной части была выполнена методика калибровки, включающая привязку координат рамки к системе визуализации и последующую проверку точности реконструкции положения катетера. Для оценки результатов разработана программа на Python, которая вычисляет евклидовы расстояния между заданными точками и координатами, полученными навигационной системой. На изображениях измерялись длины сторон и углы квадрата в пикселях, что позволяло оценить отклонения и сравнить их с эталонной геометрией стенда.

Проведённый анализ показал, что расхождения по длинам и углам не превышают инструментальную погрешность конструкции. Полученные данные подтверждают, что калибровочный стенд корректно работает в составе магнитной навигационной системы.

Литература

1. PubMed. Cardiac ablation and navigation research [Электронный ресурс]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32256872/>

К.К. Котельников, студ.; рук. Т.В. Истомина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ И МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ЭМГ СИГНАЛОВ

В управлении протезами рук имеет большое значение скорость работы системы, определение параметров сигнала и их классификация. Для создания быстрой и эффективной системы следует определиться с доменом признака для классификации: частотный или временной. Их сравнение на основе усредненных данных статьи [1] приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение временных и частотных доменов признаков

Параметр	Временные	Частотные
Точность (LDA)	87.17%	91.34%
Скорость вычислений	Высокая	Низкая (требует БПФ)
Ресурсы	Низкие	Высокие
Рекомендуемая платформа	MCU, DSP	SoC, FPGA

Следующим шагом является выбор метода классификации. Из анализа работы [2] можно сформировать таблицу 2, которая даст представление о параметрах методов классификации в одинаковых условиях.

Таблица 2. Классификаторы и их эффективность

Классификатор	Точность	Задержка	Рекомендуемый домен	Рекомендуемая платформа
LDA	90–95%	30–300 мс	Временной	MCU, DSP
SVM	90–98%	30–100 мс	Универсальный	MCU, FPGA, SoC
KNN	90–95%	1–35 мс	Временной	MCU, FPGA, SoC
MLP	93–99%	80–268 мс	Универсальный	MCU, SoC

Исходя из результатов исследований, наиболее выгодным решением для дальнейшей работы является использование временного признака сигнала и классификатора KNN для создания быстрой системы классификации реального времени.

Литература

1. Too J., Abdullah A.R., Tengku Zawawi T.N.S., Mohd Saad N., Musa H. Classification of EMG Signal Based on Time Domain and Frequency Domain Features // International Journal of Human and Technology Interaction. 2017. Vol. 1, No. 1. P. 25–28.
2. Castruita-López J.F., Aviles M., Toledo-Pérez D.C., Macías-Socarrás I., Rodríguez-Reséndiz J. Electromyography Signals in Embedded Systems: A Review of Processing and Classification Techniques // Biomimetics. 2025. Vol. 10, No. 3. P. 166. DOI: 10.3390/biomimetics10030166.

Е.А. Житникова, студ.; рук. Д.А. Фролов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ШПРИЦЕВОГО ИНФУЗИОННОГО НАСОСА

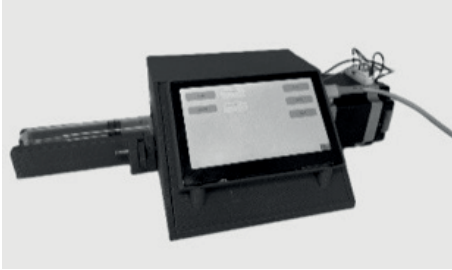


Рис. 1. Стенд шприцевого инфузионного насоса

Актуальность работы обусловлена тем, что точные системы дозированного введения лекарств критически важны для ключевых направлений современной медицины. Разработанный стенд (рис. 1) не только демонстрирует принципы работы таких систем, но и может стать основой для создания более совершенных устройств в будущем.

Управляющие сигналы с платы управления передаются через интерфейс передачи данных на драйвер электродвигателя, который преобразует их и подаёт на мотор. Вращательное движение мотора преобразуется через винтовую передачу в линейное перемещение поршня шприца, обеспечивая дозированное введение раствора в организм пациента. В схеме предусмотрен концевой выключатель для остановки мотора при достижении поршнем крайнего положения. Этапы разработки стенда: анализ аналогов, разработка механической аппаратной и программной части, а также тестирование [1].

Конструирование механической части выполнено в САПР CATIA V5. Аппаратная часть устройства состоит из следующих компонентов: платы управления на основе микроконтроллера ESP-32-S3 со встроенным LCD экраном, шагового двигателя NEMA 23, драйвера MKS SERVO57 и оптического датчика, в качестве концевой выключателя [2].

Программное обеспечение разработано на языке C с использованием операционной системы FreeRTOS. Обмен данными реализован через протокол CAN [3], а графический интерфейс создан с применением библиотеки LGVL.

Устройство успешно прошло тестирование, подтвердив работоспособность.

Литература

1. Инфузионный насос: как работает, применение, виды // atriumm — URL: <https://atriumm.ru/articles/infuzionnyy-nasos-kak-rabotaet-primenenie-vidy> (дата обращения 15.03.2025) — Текст: электронный.
2. **Т. Кенио**, Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления, Москва, Энергоатомиздат 1987, 198 с.
3. **Роберт Джи**, CAN против RS-485: почему тенденция направлена в сторону CAN — URL: <https://controleng.ru/wpcontent/uploads/19860.pdf>

*Д.Д. Ермолаев, А.В. Пустовалов, студенты;
рук. Н.А. Сержантова, к.т.н., доц. (ПензГТУ, Пенза)*

ТРЕНАЖЕР ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ ГИМНАСТИКИ

Высокая распространенность миопии и доказанная эффективность зрительной гимнастики требуют создания доступных средств, обеспечивающих не только регулярность, но и правильность выполнения упражнений [1]. Однако в большинстве существующих массовых решений контроль выполнения упражнений не осуществляется, поэтому разработка эффективного тренажера для выполнения зрительной гимнастики является актуальной задачей.

Авторами проведен сравнительный анализ существующих программ-тренажеров. Предложена архитектура программно-аппаратного комплекса, использующего в качестве биомедицинского сигнала видеопоток с камеры для интеллектуального контроля упражнений в реальном времени.

Чтобы отследить положение головы и получить точный видеосигнал, необходимо зафиксировать камеру в правильном положении. Для этих целей можно использовать, например, гироскоп смартфона. Встроенными датчиками face id определяются координаты точек головы и глаз X_0, Y_0 , изменения координат (X_i, Y_i) отслеживаются и фиксируются. Оценка результата выполнения упражнения основывается на совпадении координат глаз с заданными в задании координатами X, Y (рис. 1).

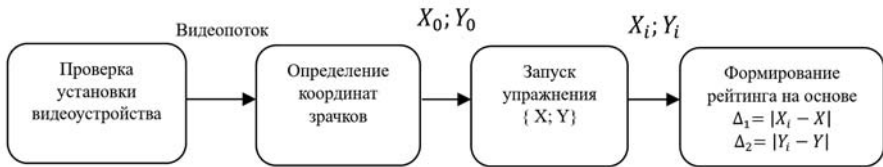


Рис. 1. Процесс обработки видеосигнала

В отличие от узкоспециализированного решения, данная система является кроссплатформенной и осуществляет контроль не только за движением глаз, но и за положением головы пользователя.

Разрабатываемый комплекс предназначен для использования в качестве средства профилактики и коррекции миопии в домашних условиях, а также может быть интегрирован в телемедицинские платформы для удаленного контроля врачами-офтальмологами.

Литература

1. Патрушева Л.В. Лечебная физическая культура при заболеваниях органов зрения. Учебно-методическое пособие. — Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2018.

А.Е. Сныткин, студ.; рук. М.Н. Крамм, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ
РЕГИСТРАТОРОВ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ
НА БАЗЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО АЦП
МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ПЕРВОГО УРОВНЯ
ЛОКАЛИЗАЦИИ МК32 AMUR (K1948BK018)**

Микросхема K1948BK018 является первым российским микроконтроллером первого уровня локализации, в условиях тенденции импортозамещения освоение данной микросхемой является важной и перспективной задачей. Основным узлом микросхемы, влияющим на точность регистрации биопотенциалов, является аналого-цифровой преобразователь разрядностью 12 бит и максимальной частотой дискретизации 800 кГц. Отказ от внешнего аналого-цифрового преобразователя обусловлен высокой стоимостью и малой доступностью аналого-цифровых преобразователей первого уровня локализации.

В настоящей работе проведена экспериментальная оценка погрешностей интегрированного аналого-цифрового преобразователя, а именно: измерение аддитивной погрешности, измерение мультипликативной погрешности, также измерение дифференциальной и интегральной нелинейности. На основе полученных данных сделан вывод о применимости интегрированного АЦП МК K1948BK018 для регистрации различных биомедицинских сигналов, таких, как: фотоплетизмограмма, электрокардиограмма, электроэнцефалограмма, электромиограмма, сигнал артериального давления, сигнал тонов Короткова.

Результаты работы могут быть использованы при разработке и реализации регистраторов биомедицинских сигналов на базе K1948BK018 без использования внешних АЦП.

Литература

1. **Островерхов В.В.** Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей, «Энергия» 1975.
2. **Л.А. Краснов, В.П. Олейник** Аппаратная регистрация электрических биопотенциалов. Биомедицинские измерительные преобразователи, Харьков «ХАИ» 2014.

*В.А. Соловьева, студ. (НИУ «МЭИ»);
рук. А.А. Меркулов, к.т.н., доцент (РТУ МИРЭА),
И.А. Сукач, ассистент (НИУ «МЭИ»)*

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ КАПИЛЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА ДНК МЕТОДОМ СЭНГЕРА

В данной работе представлен метод секвенирования Сэнгера, который использует четырехканальный капиллярный электрофорез для разделения фрагментов ДНК, меченных флуоресцентными красителями для каждого нуклеотида (А, Т, Г, Ц), с последующей регистрацией сигналов детектором флуоресценции. Обработка сигналов включает коррекцию базовой линии, фильтрацию шума и определение пиков для точного вызова оснований, что позволяет преобразовать хроматограммы в буквенные последовательности ДНК.

Предложен алгоритм обработки четырехканальных сигналов электрофореза, включающий сглаживание, детекцию пиков и обратную свертку перекрывающихся сигналов для повышения точности на 15–20% по сравнению со стандартными методами. Результаты визуализируются в виде цветных хроматограмм с пиками, соответствующими нуклеотидам, и экспортируются в FASTA-формат для дальнейшего анализа.

Разработанный подход протестирован на реальных данных генетического анализатора. Перспективы включают интеграцию с машинным обучением для автоматизированного вызова и анализа модифицированных оснований. Метод применим для секвенирования геномов и фрагментного анализа в биомедицинских исследованиях.

Литература

1. **Sanger F., Nicklen S., Coulson A.R.** DNA sequencing with chain-terminating inhibitors // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 1977. — Vol. 74, № 12. — P. 5463–5467.
2. **Ewing B., Green P.** Base-calling of automated sequencer traces using phred. II. Error probabilities // Genome Research. — 1998. — Vol. 8, № 3. — P. 186–194.

*Н.И. Кирюшин, студ., П.Р. Бичарова, студ., И.А. Сукач, асп.;
М.А. Михайлов, студ.; Н.А. Павлов, студ.;
рук. А.А. Меркулов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ОРТЕЗА

Нагревательный ортез — это медицинское фиксирующее устройство, предназначенное для обеспечения теплом определенной ткани коленного сустава.

Научная значимость работы заключается в технологии использования внешнего источника сигнала для прогрева тканей и одновременно для питания ПАВ датчика, которые, в свою очередь, предназначены для высокочувствительных и неразрушающих методов анализа поверхности. Функции нагревательного элемента и локального источника питания будут восполнять электромагнитные волны, посылаемые от внешнего источника.

Исходя из этого, важно учитывать диэлектрическую проницаемость, глубину проникновения волны и их зависимость от частоты сигнала. Частотная характеристика диэлектрических тканей была описана в терминах множественной дисперсии Коула-Коула, которая при выборе параметров является наиболее подходящей для прогнозирования поведения диэлектрика в желаемом диапазоне частот [1].

Контроль температуры необходим, чтобы не навредить пациенту. Для выполнения этой задачи было проанализировано множество датчиков, и был выбран наиболее подходящий для данного исследования — датчик поверхностных акустических волн. Этот датчик является наиболее подходящим решением, так как обладает уникальной характеристикой: датчик питается от волн, которые также идут на разогрев тканей.

Для выбора определенного режима работы ортеза была создана цифровая модель, с помощью которой можно предсказать действие будущего устройства. Благодаря этому становится возможным подбирать необходимые параметры сигнала для лечения определенных заболеваний. Также в цифровой модели можно определить диапазон безопасных амплитуд, при которых ткани частей тела не повреждаются.

Разработка устройства также может быть направлена на перспективное исследование микроволновой абляции для лечения опухолей.

Литература

1. **К.С. Коул и Р.Х. Коул:** Дисперсия и поглощение в диэлектриках: характеристики переменного тока., Журнал химической физики, апрель 1941 г., стр. 341–351.

*Н.И. Кирюшин, студ., П.Р. Бичарова, студ., И.А. Сукач, асп.;
М.А. Михайлов, студ.; Н.А. Павлов, студ.;
рук. А.А. Меркулов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ВИБРОЖИЛЕТА ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ЛЮДЕЙ С МУКОВИСЦИДОЗОМ И НЕРВНО-МЫШЕЧНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

В Европе муковисцидозом страдает один из 2000–3000 новорождённых, в России — один из 4900, что делает нашу страну шестой по частоте заболеваемости в Европе [1]. Количество пациентов с муковисцидозом в России выросло [2], но не во всех регионах есть необходимая помощь из-за отсутствия отечественной разработки специального жилета. Создание отечественного жилета с вибрацией поможет решить эту проблему.

Из двух основных методов создания вибраций был выбран наиболее подходящий с точки зрения соотношения цены и качества. Генерация вибрации создаётся с помощью нескольких независимых вибрационных катушек, работающих по принципу электромагнитов, размещаемых в особых точках воздействия на грудную клетку. Управляющим элементом является Raspberry Pi Pico. Лабораторный стенд, создается для исследования влияния вибрации на объекты, например, имитатор грудной клетки человека.

Работа также направлена на перспективное исследование влияния вибраций на органы и организм человека в целом, что способствует более точным исследованиям и позволит разработать грамотный подход при улучшении имеющихся конструкций жилета.

В ходе работы над проектом была найдена и собрана подходящая схема с источником вибрации на основе электромагнита, были рассмотрены аспекты физиотерапии грудной клетки, создано математическое описание физических процессов.

Литература

1. **Х. Куппенс, Булыженков.** Молекулярно-генетическая эпидемиология муковисцидоза: Доклад совместного совещания ВОЗ/ECFTN/МКФ(М)А/ECFS
2. **Красовский С.А., Старинова М.А.** Регистр пациентов с муковисцидозом в Российской Федерации, 2021 год. — СПб.: Благотворительный фонд «Острова», 2023, 81 с.

*Г.М. Перепёлкин, студ.;
рук. А.С. Гурьев, к.ф.-м.н. (ФГБОУ «ВНИИОФИ», Москва)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТУСА ТРОМБОЦИТОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ДРС

Метод динамического рассеяния света (ДРС) является мощным и неинвазивным инструментом для анализа наноразмерных объектов в растворе, позволяя в реальном времени отслеживать изменения их гидродинамического диаметра [1].

Актуальность метода ДРС для исследования биологических систем, в частности тромбоцитов, подтверждается его широким применением в биомедицинской диагностике и фармакологии для изучения агрегации и активации клеток.

В данной работе метод ДРС применяется для определения статуса тромбоцитов *in vitro* путем анализа размера микрочастиц в суспензии. Активация тромбоцитов приводит к изменению их формы, образованию псевдоподий и микровезикул, что существенно влияет на интенсивность и временную динамику рассеянного света.

Экспериментальная установка включает лазер, кювету с образцом и фотодетектор, регистрирующий рассеянное под углом 173° излучение. Для обработки данных автором разработана программа, вычисляющая автокорреляционную функцию и определяющая размер частиц по уравнению Стокса-Эйнштейна.

В результате эксперимента регистрировались флуктуации интенсивности рассеянного света от суспензии тромбоцитов. Полученные данные были преобразованы в автокорреляционные функции [2], анализ которых позволяет выявить появление в суспензии частиц с измененной диффузионной подвижностью.

Изменение распределения частиц по размерам является прямым индикатором процесса активации тромбоцитов. Следовательно, метод ДРС позволяет не только зафиксировать факт активации, но и получить кинетические параметры этого процесса.

Для валидации методики и отработки экспериментального протокола на установке были определены размеры стандартных наночастиц полистирола (латекса).

Литература

1. **Berne B.J., Pecora R.** Dynamic light scattering: with applications to chemistry, biology, and physics. – Dover Publications, 2000.
2. **Ferreira D., Bachelard R., et al.** Connecting field and intensity correlations: The Siegert relation and how to test it // American Journal of Physics. 2020. Vol. 88, No. 10. P. 831–837.

Направление II

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **Information technologies**

Руководитель направления:

Директор института
информационных и вычислительных
технологий НИУ «МЭИ»

к.т.н., доцент

Вишняков Сергей Викторович

Секция 12
УСТРОЙСТВА И УЗЛЫ СИСТЕМ
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
Devices and modules of IoT Systems

Председатель секции: к.т.н., доцент Крутских Владислав Викторович

Секретарь секции: Ушков Андрей Николаевич

В.А. Юшин, студ.; рук. В.В. Крутских, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ КАРТ ПЭС В АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК

В современных условиях повышения требований к точности и надежности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) проблема уменьшения ионосферных погрешностей, вносящих наибольший вклад в ошибку позиционирования, становится особенно актуальной [1]. Это связано с необходимостью обеспечения высокоточной навигации в таких важных областях, как автономные транспортные системы, геодезия, авиация. Существующие методы коррекции, такие как модель Клобучара, не обеспечивают необходимой точности координат. Дифференциальные методы коррекции демонстрируют высокую эффективность, однако их применение ограничено зоной покрытия сети наземных опорных станций.

Целью данной работы является анализ эффективности алгоритма уменьшения ионосферных погрешностей для потребителя ГНСС, основанного на вычислении дифференциальных поправок по данным сети наземных референц-станций с интеграцией глобальных карт ПЭС [2].

В рамках работы был разработан и реализован метод, интегрирующий глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы в алгоритм решения навигационной задачи потребителя. Этот подход позволяет учитывать реальные пространственно-временные вариации ТЕС. Для оценки его эффективности проведено сравнительное исследование с моделью Клобучара.

Результаты моделирования наглядно показали, что предложенный подход позволяет в большей степени снизить ошибку позиционирования, обусловленную влиянием ионосферы, по сравнению с моделью Клобучара. Полученное повышение точности подтверждает практическую значимость разработанного метода для решения задач высокоточной навигации.

Литература

1. **Перов А.И.** ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Радиотехника. 2020.
2. **Аржанников А.А., Готов В.Д., Митрикас В.В.** Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11.

М.Г. Иванов, студ.; рук. К.А. Вытовтов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ БИТОВОГО ПОТОКА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА БПЛА

Активное использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) приводит к значительному ухудшению электромагнитной обстановки в наиболее нагруженных инфокоммуникационных диапазонах: 2.4 ГГц, 5.8 ГГц [1, 2]. Высокая плотность сетки частот, а также использование схожих протоколов связи создают условия, при которых традиционные методы энергетического или спектрального детектирования становятся недостаточно эффективными для надежной идентификации и классификации сигналов БПЛА [2]. В связи с чем, в данной работе решается задача фильтрации битового потока видеосигнала БПЛА на фоне естественных шумов и интенсивных сигналоподобных помех.

Предложен метод частотно-временной фильтрации битового потока на базе программно-определяемого радио (SDR), представленный на рис. 1. Высокочастотный сигнал принимается антенной Ант., фильтруется блоком ПФ и усиливается МШУ, после чего переносится на нижние частоты посредством блоков СМ, ГУН, ФНЧ, и далее оцифровывается АЦП; после этого его синфазные и квадратурные отсчеты обрабатываются в блоках ПЛИС и МК, анализируются и сопоставляются с битовыми масками в блоке ПК. Проведен анализ спектральных портретов БПЛА, дана статистическая оценка их сигналов. Полученные результаты могут быть полезны при построении систем электромагнитного мониторинга и локальной навигации, а также в задачах детектирования и классификации устройств стандарта 802.11 и Интернета вещей.

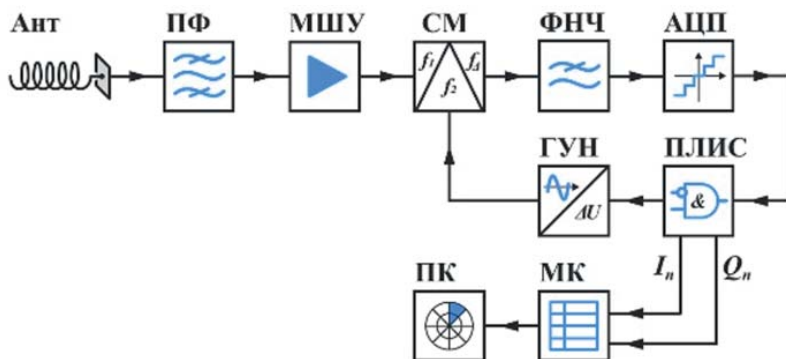


Рис. 1. Структурная схема фильтра битового потока на базе программного радио

Литература

1. Natkaniec M., Bieryt N. An analysis of the mixed IEEE 802.11ax wireless networks in the 5 GHz band // Sensors 2023, Vol. 23, No. 10, May 2023, p. 49642.
2. Akhter Z., Bilal R.M., Telegenov K., Feron E., Shamim A. Indigenously Developed HD Video Transmission System for UAVs Employing a 3×3 MIMO Antenna System // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2022, Vol. 3, P. 940–947.

Д.С. Чукашов, асп.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ПЭДВ

Развитие сетей 5G требует поиска новых решений для КВЧ-диапазона, включая излучатели и антенные системы. К ним предъявляются повышенные требования как к диапазону рабочих частот, так и к массогабаритным характеристикам и возможности интеграции в существующие системы и комплексы. Антенны на основе полужэкранированного диэлектрического

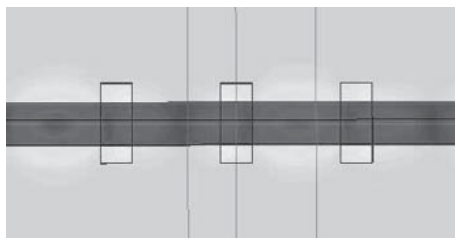


Рис. 1. Модель щелевой антенной решетки на ПЭДВ

волновода (ПЭДВ) сочетают компактность и технологичность с высоким КПД и направленными свойствами [1]. Технические характеристики антенн на ПЭДВ обладают рядом преимуществ в сравнении с рядом технологий в миллиметровом диапазоне, что делает перспективным использование антенных систем на ПЭДВ в системах 5G/6G [2] и радарных системах беспилотных аппаратов [3], а также устройствах Интернета Вещей.

В настоящей работе проводится анализ моделей антенных решеток на ПЭДВ при различном расположении излучающей щели, и разном количестве щелей в волноводе. Для этого были проведены численные и натурные исследования электромагнитного поля в ближней и дальней зоне в диапазоне от 25 ГГц до 37 ГГц.

В результате работы были получены зависимости диаграммы направленности от параметров щелевой антенны на ПЭДВ и даны рекомендации по проектированию щелевых антенн на ПЭДВ.

Литература

1. **Liu C. M., Carignan L. P., Wu K.** Crosstalk and leakage suppression by mode selectivity and conversion in terahertz hybrid metallo-dielectric waveguide crossover and intersections // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 2024. — Т. 72. — №. 12. — С. 6943–6955.
2. **Мирошникова И.Н., Крутских В.В., Сизякова А.Ю., Ушков А.Н., Чукашов Д.С., Трофимов А.Ю., Мирзоян А.Э.** Узлы поворота полужэкранированного диэлектрического волновода для устройств связи космических аппаратов. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12. № 2. С. 80–89.
3. **Крутских В.В. и др.** Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // *Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей*. — 2021. — №. 2 (37). — С. 7–14.

Г.А. Никитин, студ.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

ОТЛАДОЧНАЯ ПЛАТА ДЛЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА K1921BG015

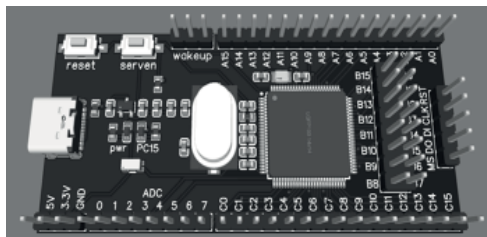


Рис. 1. Отладочная плата для микро-контроллера K1921BG015

Микроконтроллеры являются ключевыми компонентами современной радиоэлектронной аппаратуры, к которым предъявляются высокие требования по функциональности, плотности компоновки и удобству интеграции в разрабатываемые устройства. Наличие большого количества разнородных функций в рамках одной микросхемы при-

водит к высокой плотности расположения выводов, что затрудняет прямое подключение к ним без применения специализированной печатной платы [1]. Создание такой платы для каждой проектной идеи является ресурсоемким процессом. Решением данной проблемы являются отладочные платы, которые сочетают технологичность и удобство эксплуатации, предоставляя пользователю унифицированные интерфейсы для подключения внешних компонентов.

В настоящей работе рассматривается разработка отладочной платы для микроконтроллера K1921BG015, включая проектирование цепей питания и тактирования, а также организацию внешних интерфейсов. Выбор данной микросхемы обусловлен ее перспективностью для применения в широком спектре устройств — от учебных проектов до промышленных систем [2], благодаря таким характеристикам, как RISC-V ядро с тактовой частотой до 50 МГц, ультра-низкое энергопотребление и набор периферийных контроллеров.

В результате работы была разработана отладочная плата, обеспечивающая цепи питания и тактирования микроконтроллера, штырьевые разъемы для доступа к выводам, интерфейсы USB-C и JTAG, а также элементы индикации и управления.

Литература

1. Liu C.M., Carignan L.P., Wu K. Crosstalk and leakage suppression by mode selectivity and conversion in terahertz hybrid metallo-dielectric waveguide crossover and intersections // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2024. — Т. 72. — №. 12. — С. 6943–6955.
2. НИИЭТ, Микросхема интегральная K1921BG015 Руководство пользователя [Электронный ресурс] — URL: <https://niiet.ru/wp-content/uploads/2025/10/%D0%A0%D0%9F%D0%9A1921%D0%92%D0%93015.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).

Л.В. Митрохина, студ.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ ДЛЯ УМНОГО ДОМА НА ОСНОВЕ MESH-СЕТИ

Современные системы умного дома предъявляют повышенные требования к надежности и масштабируемости сенсорных сетей. Существующие решения на основе традиционных звездообразных топологий демонстрируют ограниченную устойчивость к сбоям и сложности при расширении функциональности [1]. В данном контексте особый интерес представляют mesh-сети, обладающие потенциалом для создания отказоустойчивых и легко масштабируемых инфраструктур домашней автоматизации [2].

Целью работы является разработка сенсорной сети на основе mesh-топологии, ориентированной на задачи домашней автоматизации. В рамках исследования предполагается решить следующие задачи: создать аппаратную платформу на базе микроконтроллеров ESP32 в условиях жилых помещений. Аппаратная часть системы реализована на основе микроконтроллеров ESP32, обеспечивающих необходимую вычислительную производительность и поддержку беспроводных интерфейсов связи.

Предложенное решение представляет собой перспективную платформу для построения домашних автоматизированных систем, сочетающую высокую надежность, масштабируемость и экономическую эффективность. Актуальность разработки подтверждается растущим спросом на интеллектуальные системы домашней автоматизации, требующие обеспечения бесперебойной работы и простоты расширения функциональности. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию энергопотребления системы и разработку специализированных протоколов безопасности.

Литература

1. **Ushkov A.N. et al.** Automating electric power consumption with a smart electricity meter // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2024. — С. 599–604.
2. **Strelkov N.O., Krutskikh V.V., Shalimova E.V.** Programming STM32 nucleo platform for IoT education using STM32duino and mbed OS // 2022 VI international conference on information technologies in engineering education (inforino). — IEEE, 2022. — С. 1–6.

А.М. Чепарин, студ.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ КВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

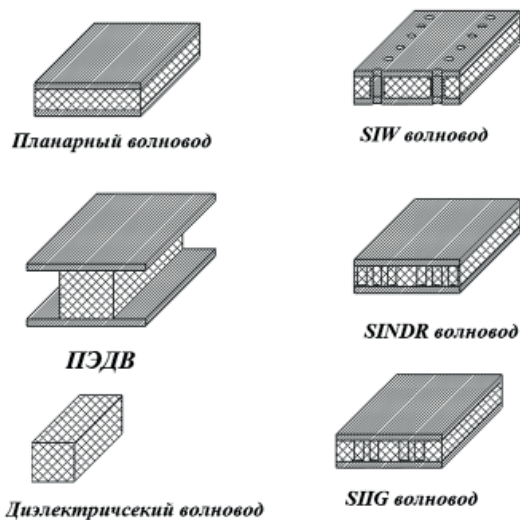


Рис. 1. Линии передачи миллиметрового диапазона

полужэкранированного диэлектрического волновода, SIW волновода, SINRD волновода и SIIG волновода. Сравнение линий передачи проводилось по величине погонных потерь в диапазоне частот от 25–37 ГГц, от 37 до 53 ГГц и от 53 до 77 ГГц. Анализ характеристик показал, что в значительной мере на передаточную характеристику оказывает влияние методика и тип возбуждения основного колебания, что необходимо учитывать при анализе устройств [3]. Поэтому в работе модели узлов возбуждаются через волноводный переход с металлического волновода на соответствующую технологию.

В результате работы были предложены рекомендации использования той или иной волноводной линии передачи в трех исследуемых частотных диапазонах.

Литература

1. **Крутских В.В. и др.** Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. — 2021. — №. 2 (37). — С. 7–14.
2. **Крутских В.В. и др.** Широкополосный металлодиэлектрический волноводный тракт с малыми потерями КВЧ-диапазона // Радиотехника. — 2021. — Т. 8. — №. 3. — С. 89–98.
3. **Krutsikh V.V. et al.** Irregularities in a metal-dielectric shielded waveguide with low losses for the frequency range 90–100 GHz // Physics of Wave Processes and Radio Systems. — 2022. — Т. 25. — №. 3. — С. 58–66.

К.А. Гуляев, студ.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

МНОГОПОЗИЦИОННАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА В УСЛОВИЯХ УМНОГО ГОРОДА

В современных задачах умного города важную роль приобретают задачи безопасности, связанные с использованием систем радиолокации. Особенно важны точность и устойчивость определения положения беспилотных аппаратов. Многопозиционные радиолокационные системы обеспечивают значительные преимущества по сравнению с одиночными локаторами. Применение множества приёмников позволяет снизить ошибки определения местоположения за счёт объединённой обработки сигналов с разных точек [1].

В настоящей работе обсуждается исследование методов многопозиционной радиолокации и навигации с целью повышения уровня контроля движения беспилотной техники [2]. Проведены сравнительный анализ методов по критериям точности. Экспериментальная проверка осуществлялась на основе макета эмитирующей радиолокационную систему. В качестве канала связи использовался радиоканал с центральной частотой 2,4 ГГц [3]. Обработка данных осуществлялась на базе веб-сервера.

В результате работы была проведена оценка методов и составлены рекомендации применения алгоритмов радиолокации в рамках системы умный город.

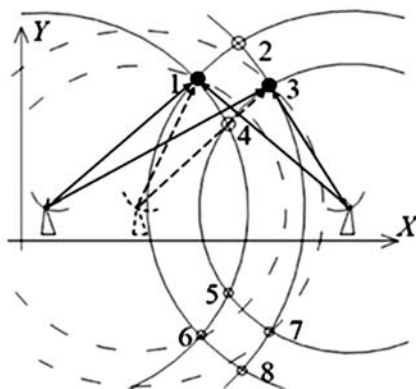


Рис. 1. Принцип многопозиционной радиолокации

Литература

1. Ushkov A.N. et al. Radio navigation algorithms for tasks of industrial internet of things // 2024 international russian smart industry conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2024. — С. 592–598.
2. Крутских В.В., Сизякова А.Ю., Ушков А.Н., Фролов Д.Ю., Чукашов Д.С., Трофимов А.Ю., Селин Д.С., Мирзоян А.Э. Оценка влияния обратной связи на характеристики фильтров в системах космической связи. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12. № 1. С. 52–63.
3. Ushkov A.N. et al. Industrial VSWR automation module in the EHF range // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — IEEE, 2024. — С. 714–719.

В.Д. Ганин, студ.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЕ РАДИО В ЗАДАЧАХ БЕЗОПАСНОСТИ УМНОГО ГОРОДА

В современных задачах умного города, связанных с обеспечением безопасности, возрастает роль систем радиолокации. Особое значение имеют точность и устойчивость определения местоположения беспилотных летательных аппаратов. В этом контексте передача модулированных цифровых сигналов в S-диапазоне традиционно реализуется с помощью передающего тракта, включающего ЦАП, синтезатор частот, фильтр и модулятор [1]. Источником сигнала для ЦАП может служить микроконтроллер, ПЛИС или управляемый генератор. Однако такая схема требует индивидуальной настройки и тщательного подбора импеданса для каждого компонента, что ведет к усложнению конструкции, снижению эксплуатационных характеристик и повышению требований к системе питания [2].

В качестве альтернативы предлагается использовать технологию программно-определяемого радио (Software-Defined Radio, SDR), которая интегрирует в себе весь приемопередающий тракт. В данной работе рассматриваются анализ и применение SDR для передачи сигналов в S-диапазоне, а также возможность использования SDR в качестве базового компонента приемопередающего модуля антенной решетки [3]. Одним из примеров подобных решений является микросхема AD9361, способная работать в частотном диапазоне от 70 МГц до 6 ГГц.

В результате работы проведена оценка параметров SDR и сформирована конфигурация, рекомендуемая для применения в приемопередающем модуле в рамках систем умного города.

Литература

1. **Ushkov A.N. et al.** Radio navigation algorithms for tasks of industrial internet of things // 2024 international russian smart industry conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2024. — С. 592–598.
2. **Ushkov A.N. et al.** Industrial VSWR automation module in the EHF range // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — IEEE, 2024. — С. 714–719.
3. **Ushkov A.N. et al.** Industrial internet of things platform for water resource monitoring // 2023 international Russian smart industry conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2023. — С. 593–599.

*С.Е. Пономарева, студ.;
рук. В.В. Крутских, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

УДАЛЁННЫЙ МОНИТОРИНГ СЕРДЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА БАЗЕ ХОЛТЕРА

Актуальные тенденции в области здравоохранения диктуют необходимость в высокоточных и непрерывных системах удаленного мониторинга физиологических параметров, в первую очередь сердечной. Успешная реализация таких систем способствует ранней диагностике заболеваний, оперативному реагированию на критические состояния и, как следствие, улучшению качества жизни пациентов.

Данная работа посвящена исследованию методов удаленного мониторинга сердечной активности с применением холтеровских регистраторов и алгоритмов обработки сигналов. Особое внимание уделено вопросам беспроводной передачи данных в облачные хранилища и разработке системы анализа кардиограмм на основе методов машинного обучения.

В рамках исследования был проведен сравнительный анализ различных типов биосенсоров, в частности электрокардиографических (ЭКГ) с использованием электродов различной конструкции. Оценена эффективность алгоритмов обработки ЭКГ-сигналов, включая методы шумоподавления, детектирования R-зубцов и анализа RR-интервалов для точного определения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и индефикации аритмий. Экспериментальные данные демонстрируют высокую точность и надежность предложенной системы в условиях разнообразных физических нагрузок и повседневной активности пациентов.

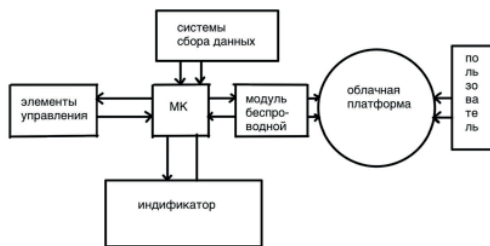


Рис. 1. Структурная блок-схема устройства

Литература

1. Alotaibi E., Sulaiman R.B., Almaiah M. Assessment of cybersecurity threats and defense mechanisms in wireless sensor networks // J. Cyber Secur. Risk Audit. — 2025. — Т. 2025. — №. 1. — С. 47–59.
2. Ushkov A.N. et al. Blood Pressure Monitor From GSM to STM32 // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2025. — С. 754–759.

А.Ю. Трофимов, асп.; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРА С РЕЗОНАТОРОМ В ФОРМЕ ДИСКА И КОЛЬЦА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЭДВ

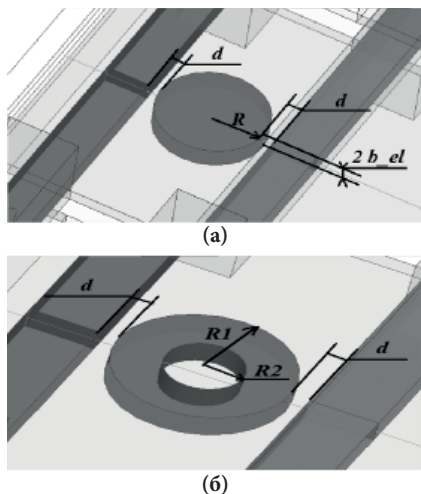


Рис. 1. Модели полосового фильтра на ПЭДВ с дисковым (а) и кольцевым (б) ДР

Исследование проводилось в диапазоне от 25 ГГц до 37 ГГц при помощи численного и физического эксперимента. На базе частотных зависимостей матрицы рассеяния рассчитаны частотно-избирательные характеристики узлов и составлены рекомендации по их использованию.

В результате численного моделирования установлено, что дисковая конфигурация резонатора обладает большей густотой спектра собственных резонансов по сравнению с кольцевой, что открывает перспективы для создания миниатюрных фильтров с требуемой полосой пропускания в составе антенных систем на ПЭДВ.

Литература

1. Мирошникова И.Н., Крутских В.В., Сизякова А.Ю., Ушков А.Н., Чукашов Д.С., Трофимов А.Ю., Мирзоян А.Э. Узлы поворота полуэкранированного диэлектрического волновода для устройств связи космических аппаратов. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12. № 2. С. 80–89.
2. Крутских В.В. и др. Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. — 2021. — №. 2 (37). — С. 7–14.

И.Н. Малушко; рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ КОММУНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В рамках реализации парадигмы умного города особую значимость приобретают задачи комплексной автоматизации управления объектами критической инфраструктуры. Одним из ключевых аспектов данной проблематики является обеспечение эффективного и безопасного функционирования систем сбора и временного хранения твердых бытовых отходов (ТБО). Традиционно применяемые методы мониторинга, основанные на визуальном контроле и регламентном обслуживании, демонстрируют свою недостаточную эффективность в условиях растущих требований к оперативности реагирования [1]. Несвоевременное обнаружение таких критических инцидентов, как переполнение контейнеров, механические повреждения или возникновение очагов возгорания, способно привести к значительным экономическим и экологическим последствиям [2].

Целью работы является разработка системы мониторинга для дистанционного контроля заполнения мусорных баков и раннего обнаружения пожара. Система должна обеспечивать сбор данных с распределенных датчиков и передачу на центральный сервер для принятия оперативных решений. Аппаратная платформа системы построена на микроконтроллере Arduino Nano. Для измерения уровня заполнения используется ультразвуковой датчик расстояния, а для противопожарной безопасности — датчики температуры и газа. Передача данных осуществляется через Wi-Fi модуль ESP8266. Программное обеспечение реализовано на C++ в среде Arduino IDE.

Разработана автономная система мониторинга, не требующая постоянного вмешательства. Перспективой работы является интеграция резервных источников питания для обеспечения отказоустойчивости при перебоях электропитания.

Литература

1. **Ushkov A.N. et al.** Industrial internet of things platform for water resource monitoring // 2023 international Russian smart industry conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2023. — С. 593–599.
2. **Mikhailov M.S., Strelkov N.O.** Application of wi-fi and LoRa technologies for wireless measurement of physical quantities // 2019 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). — IEEE, 2019. — С. 1–4.

Д.С. Селин (АО «Российские космические системы»);
 Д.С. Чукашов, асп. (НИУ «МЭИ»);
 рук. асс. А.Н. Ушков (НИУ «МЭИ»)

ЗАЩИЩЕННОСТЬ РЭА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

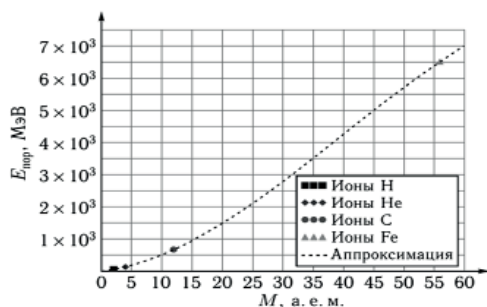


Рис. 1. Зависимость пороговой энергии от атомной массы ионов при фиксированной толщине массовой защиты

ется значительным разнообразием радиационных эффектов. В связи с этим ключевое значение приобретает корректное моделирование процессов воздействия ИИ космического пространства при помощи специализированных систем автоматизированного проектирования.

В настоящей работе моделируется воздействие ИИ на защитный конструктив РЭА [1]. В представленной работе моделирование воздействия ИИ на РЭА проводится в программно-технологическом пакете SRIM [2]. Проведен анализ защитного конструктива РЭА по химическому составу и фактической толщине, используемой в КА. При моделировании в программно-технологическом пакете получен информативный в области радиационной стойкости РЭА параметр в виде пороговой энергии ($E_{\text{пор}}$) ИИ.

Результатом представленной работы является полученная зависимость пороговой энергии от атомной массы рассматриваемых ионов при фиксированной толщине массовой защиты РЭА (см. рисунок 1).

Литература

1. Nastasi M., Mayer J.W., Hirvonen J.K. Ion-solid interactions: fundamentals and applications. Cambridge University Press. Cambridge Solid State Science Series, 1996. 540 p.
2. Программно-технологический пакет моделирования SRIM: официальный сайт. URL: srim.org/. (Дата обращения 03.12.2025).

*Е.Ю. Денисов, С.П. Перцев (НИЯУ «МИФИ»);
И.М. Карпова, Д.А. Жуков, студ.;
рук. А.Н. Ушков (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТИ LORAWAN В СПУТНИКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ

В эпоху взрывного роста интернета вещей (IoT) и коммерциализации космоса, исследование возможности использования энергоэффективных наземных технологий, таких как LoRaWAN, для связи с околоземными аппаратами является крайне актуальной научно-прикладной задачей. Структурная сеть LoRaWAN представляет собой иерархическую систему из четырёх ключевых элементов: конечное устройство, шлюз, сетевой сервер и сервер приложений [1].

В настоящей работе проводится моделирование с целью проверки работоспособности технологии LoRaWAN за пределами Земли. Для этого рассмотрен случай, когда шлюз остается в наземном сегменте, а абонентское устройство размещается на борту российского сегмента Международной космической станции (МКС). Таким образом, радиоканал «устройство-шлюз» трансформируется в звено «космос-Земля», что принципиально меняет условия связи (дальность, доплеровский сдвиг, видимость). Структура сети представлена на рисунке 1).



Рис. 1. Структура наземной сети LoRaWAN

В результате работы моделирование радиоканала «МКС-Земля» [2] по протоколу LoRaWAN было проведено в среде Octave с использованием Simulink для точного расчёта орбиты и условий видимости. Это позволило смоделировать физический уровень передачи данных с учётом всех ключевых искажений.

Литература

1. Mikhailov M.S., Strelkov N.O. Application of wi-fi and LoRa technologies for wireless measurement of physical quantities // 2019 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). — IEEE, 2019. — С. 1–4.
2. Крутских В.В. и др. Металлодиэлектрический экранированный волновод с малыми потерями для диапазона частот 90–100 ГГц // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. — 2021. — №. 2 (37). — С. 7–14.

*И.А. Апхудов, В.Ю. Прусов, А.И. Мохамед,
И.М. Минченков, М.Т. Шамшидов, студ.;
рук. А.Н. Ушков (НИУ «МЭИ»)*

ТЕХНОЛОГИИ IOT ДЛЯ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ

В эпоху взрывного роста интернета вещей (IoT) и цифровизации медицины, исследование возможностей интеграции интеллектуальных сетевых технологий в хирургическую практику, в частности в лапароскопию, является крайне актуальной научно-прикладной задачей. Структура IoT-экосистемы в операционной представляет собой иерархическую систему из ключевых элементов: умные датчики и инструменты, агрегирующие шлюзы, сетевые серверы и платформы для анализа данных и управления [1].

В контексте малоинвазивной хирургии моделирование и внедрение IoT нацелены на создание «умной операционной», где критически важные параметры работы оборудования, состояние пациента и действия хирурга объединяются в единый цифровой контур. Целью настоящей работы стал анализ технологий IoT направленный на интегрирование облачных технологий в хирургический процесс. Данная система представляет собой комплексную киберфизическую систему, что принципиально меняет требования к надёжности, задержкам передачи данных и безопасности.

В результате работы были проанализированы ключевые IoT-технологии, сформирован алгоритм их интеграции в хирургический контур, а также разработана концептуальная архитектура программно-аппаратного комплекса для обработки сенсорных данных и управления параметрами «умной» операционной в режиме реального времени.

Литература

1. **Ushkov A.N. et al.** Blood Pressure Monitor From GSM to STM32 // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2025. — С. 754–759.
2. **Ushkov A.N. et al.** Industrial internet of things platform for water resource monitoring // 2023 international Russian smart industry conference (SmartIndustryCon). — IEEE, 2023. — С. 593–599.
3. **Korenevskiy N.A. et al.** Using fuzzy mathematical model in the differential diagnosis of pancreatic lesions using ultrasonography and echographic texture analysis // Critical Reviews™ in Biomedical Engineering. — 2024. — Т. 52. — №. 1.
4. **Krutsikh V.V. et al.** Smart cloud equipment tracking and control system // 2024 international conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2024. — С. 783–788.
5. **Mikhailov M.S., Strelkov N.O.** Application of wi-fi and LoRa technologies for wireless measurement of physical quantities // 2019 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). — IEEE, 2019. — С. 1–4.

*М.В. Морозова, Н.И. Репин, студ.;
рук. А.Н. Ушков, асс. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ IOT

Актуальные тенденции в области цифровой медицины и телеметрии диктуют необходимость создания высоконадежных и эффективных алгоритмов обработки многоканальных физиологических сигналов, в первую очередь электрокардиограммы (ЭКГ). Качественная предварительная обработка является критически важным этапом для последующего точного анализа данных в системах удаленного мониторинга [1].

Данная работа посвящена исследованию и сравнительному анализу программной реализации ключевых алгоритмов предварительной обработки сигналов многоэлектродной ЭКГ-системы [2]. Особое внимание уделено трем фундаментальным этапам: фильтрации высокочастотных шумов, коррекции низкочастотного дрейфа изолинии и синхронному накоплению кардиоциклов для повышения соотношения сигнал/шум. Проведен детальный сравнительный анализ результатов работы эквивалентных программных модулей, включая визуальную и количественную оценку (расчет среднеквадратической ошибки), а также оценку производительности [3].

Использование многоканальной конфигурации в связке с облачными IoT-алгоритмами позволило достичь повышенной помехоустойчивости и диагностической информативности в условиях разнообразных физических нагрузок и повседневной активности пациентов. Система продемонстрировала возможность непрерывного мониторинга, оперативной телеметрии и аналитики, что подчеркивает ее высокую надежность и практическую значимость для превентивной кардиологии и удаленного наблюдения за пациентами.

Литература

1. **Ushkov A.N. et al.** Blood Pressure Monitor From GSM to STM32 // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — IEEE, 2025. — С. 754–759.
2. **Стрелков Н.О., Крам М.Н., Жихарева Г.В.** Неоднородная электродинамическая модель грудной клетки человека в форме эллиптического цилиндра // Журнал радиоэлектроники. — 2011. — №. 7. — С. 6–6.
3. **Крутских В.В. и др.** Оценка влияния обратной связи на характеристики фильтров в системах космической связи. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12. № 1. С. 52–63.

Секция 13

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Mathematical modeling

Председатель секции: к.ф.-м.н. Вестфальский Алексей Евгеньевич

Секретарь секции: к.ф.-м.н. Бирюков Алексей Михайлович

*Д.Я. Исмаилов, студ.; рук. И.А. Рудаков, д.ф.-м.н., проф.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

ТЕОРЕМЫ О ГОРНОМ ПЕРЕВАЛЕ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ К НЕЛИНЕЙНЫМ КРАЕВЫМ ЗАДАЧАМ

Код ГРНТИ: 27.35.31.

В настоящей работе рассматриваются краевые задачи для нелинейных дифференциальных операторов, возникающих в механике деформируемых балок. Исследуется структура функционала, определяемого на гильбертовом пространстве $H^2(0, L)$, где L — длина балки, с условиями Дирихле и Неймана, и формулируются условия существования критических точек функционала через теоремы о горном перевале. Особое внимание уделено анализу функции U_{xxx} , где U — вертикальное смещение балки, x — координата вдоль балки. Используются условия Пале — Смейла, свойства вполне непрерывных операторов и отображений в пространствах Соболева $W_p^k(0, L)$.

Актуальность работы обусловлена необходимостью обоснования существования решений для широкого класса нелинейных краевых задач в инженерной механике и математической физике. Новизна исследования заключается в расширении классических теорем о горном перевале на функционалы, определяемые в банаховых пространствах с нелинейными операторами, а также в доказательстве существования критических точек для операторов, не удовлетворяющих строгим условиям компактности, с использованием современных методов вариационного анализа.

Личный вклад автора состоит в формулировке новых условий применимости теорем о горном перевале к нелинейным краевым задачам балки, доказательстве лемм о вполне непрерывности соответствующих операторов и уточнении требований к функционалам для обеспечения выполнения условий Пале — Смейла в пространствах Соболева.

Перспективы использования полученных результатов включают применение к задачам устойчивости и вибрации конструкций, оптимизации инженерных систем, а также к расширению теоретических методов вариационного анализа в функциональном пространстве. Полученные результаты могут быть использованы для численных схем и методов приближенного решения нелинейных задач.

Ключевые слова: Теорема о горном перевале, колебания балки, вполне непрерывный оператор, нелинейные краевые задачи, условия Пале — Смейла, гильбертово пространство, банахово пространство, пространство Соболева.

Р.Р. Нурғалиев, студ.; рук. А.О. Щирий, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ИОНОГРАММАМ ДИГИЗОНДОВ DPS

В работе рассматриваются методы обработки и анализа данных вертикального радиозондирования ионосферы, полученных с использованием цифровых ионозондов серии Digisonde DPS. Основное внимание уделено исследованию структуры и содержимого файловых форматов RSE, SBF и MMM, применяемых для хранения результатов автоматического и полуавтоматического считывания ионограмм.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью систематизации и унификации больших массивов данных наблюдений, получаемых при мониторинге ионосферы, для их последующего использования в задачах радиосвязи и космической метеорологии. Наличие множества форматов представления данных затрудняет их совместную обработку и сравнительный анализ, что делает разработку универсальных программных инструментов особенно актуальной.

Проведено декодирование бинарных данных различных форматов и их преобразование в табличную форму с использованием языка программирования Python, что позволило реализовать универсальный парсер исходных файлов. Разработанное программное обеспечение обеспечивает извлечение параметров ионосферных слоёв, включая критические частоты foE, foF1, foF2 и виртуальные высоты отражения.

Полученные данные подвергнуты статистическому и визуальному анализу для выявления динамики изменений характеристик ионосферы в зависимости от времени суток и геофизических условий. Отмечена корреляция между критическими частотами и параметрами солнечной активности, что подтверждает информативность выбранного подхода.

Новизна исследования заключается в создании универсального инструмента обработки исходных данных дигизондов, обеспечивающего автоматизацию первичного анализа и формирование информативных графических представлений ионограмм. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования условий радиосвязи, анализа космической погоды и дальнейшего развития методов цифровой обработки данных в ионосферных исследованиях.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, радиозондирование, Digisonde, RSE, SBF, MMM, критическая частота, виртуальная высота, Python.

*М.О. Арсентьев, студ.;
рук. Ю.К. Тимошенко, д.ф-м.н., доцент (ВГУ, Воронеж)*

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ

Код ГРНТИ: 27.35.57.

Работа посвящена математическому моделированию квантовых состояний электрона в центральном поле. Цель — построение численной модели для анализа энергетического спектра и волновых функций системы.

Используется радиальное уравнение Шрёдингера. Для решения применяются методы конечных разностей, пристрелки и Нумерова, обеспечивающие нахождение собственных значений оператора Гамильтона.

Разработана программа на Python, позволяющая рассчитывать спектр энергий и формы волновых функций. Проанализировано влияние радиуса квантовой ямы и глубины потенциала на энергетические уровни электрона.

Результаты моделирования подтвердили квантово-размерный эффект: уменьшение радиуса ямы увеличивает энергию уровней. Сравнение с аналитическими решениями для простых потенциалов подтвердило корректность модели.

Разработанная модель и программа могут использоваться в научных и учебных целях при изучении квантовой механики и вычислительной физики.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнение Шрёдингера, метод конечных разностей, метод пристрелки.

Литература

1. **Ю.К.Тимошенко.** Численное решение стационарного уравнения Шрёдингера: теория возмущений. Учебное пособие. Воронеж: Научная книга, 2019. 14 с.

Л.В. Провоторова, асп.;
рук. Ю.А. Дубинский, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

НЕРАВЕНСТВА ТИПА ПУАНКАРЕ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧЕ НЕЙМАНА

Пусть $G \subset \mathbb{R}^2$ — ограниченная область с липшицевой границей Γ . На основе специального ортогонального разложения вектор-функций

$$\vec{u}(x) = (\vec{u}(x), \vec{\Phi}(x)) \vec{\Phi}(x) + (\vec{u}(x), \vec{\Psi}(x)) \vec{\Psi}(x), \text{ где } \vec{\Phi}|_{\Gamma} = \vec{\tau}, \vec{\Psi}|_{\Gamma} = \vec{n},$$

вводятся функциональные подпространства

$$\vec{W}_{2,\Phi-ort}^1(G) = \{ \vec{u} \in \vec{W}_2^1(G) \mid \int_G (\vec{u}, \vec{\Phi}) \vec{\Phi} dx = 0 \},$$

аналогично вводится $\vec{W}_{2,\Psi-ort}^1(G)$.

Лемма. Пусть система функций $\Phi_1(x), \Phi_2(x)$ линейно независима в пространстве $L_2(G)$. Тогда для любой вектор-функции $\vec{u} \in \vec{W}_2^1(G)$ справедливо неравенство

$$\int_G |\vec{u}|^2 dx \leq M \left(\int_G |\nabla \vec{u}|^2 dx + \left| \int_G (\vec{u}, \vec{\Phi}) \vec{\Phi} dx \right|^2 \right),$$

где $M > 0$ — постоянная.

Полученные результаты применяются для доказательства корректной разрешимости системной задачи Неймана

$$\begin{cases} -\Delta \vec{u}(x) = \vec{h}(x), x = (x_1, x_2) \in G, \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}|_{\Gamma} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

а именно, доказана следующая теорема.

Теорема. Для любой вектор-функции $\vec{\Phi}(x) = (\Phi_1(x), \Phi_2(x))$, компоненты которой линейно независимы в пространстве $L_2(G)$, и любой вектор-функции $\vec{h} \in \vec{L}_2(G)$, удовлетворяющей условию $\int_G (\vec{h}, \vec{\epsilon}) dx = 0$, существует единственное слабое решение $\vec{u}_0 \in \vec{W}_{2,\Phi-ort}^1(G)$ задачи Неймана (1). Любое другое решение из пространства $\vec{W}_2^1(G)$ отличается от $\vec{u}_0$ на аддитивную вектор-постоянную.

Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект FSWF-2023-0012).

Литература

1. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н Колмогоров, С.В. Фомин — М.: Наука, 1976.
2. Дубинский Ю.А., Зубков П.В. Неравенства Пуанкаре для 3D-векторных полей и задача Неймана // Проблемы математического анализа: Выпуск 127. С. 91–107. 2024.

А.А. Николаев, асп.;
рук. А.А. Амосов, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ЭКРАНОВ С ЧЕРЕДУЮЩИМИСЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Рассматривается одномерная нестационарная начально-краевая задача, описывающая процесс распространения тепла в системе, состоящей из $2n$ теплопроводящих серых экранов с чередующимися теплофизическими свойствами с шириной ε_1 и ε_2 для экранов с нечетными и четными номерами соответственно, причем $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1/n$. Экраны разделены вакуумными прослойками и представляют собой слои однородного теплопроводящего материала с постоянной удельной теплоемкостью $c_1 > 0$ и $c_2 > 0$, теплопроводностью $k_1 > 0$ и $k_2 > 0$, плотностью $\rho_1 > 0$ и $\rho_2 > 0$, степенью черноты θ_1 , $0 < \theta_1 \leq 1$ и θ_2 , $0 < \theta_2 \leq 1$ для экранов с нечетными и четными номерами соответственно. Уравнение теплопроводности дополнено начальными условиями и граничными условиями теплообмена излучением по закону Стефана-Больцмана на границе раздела экранов и на границах системы экранов.

В рамках проведенного исследования были установлены существование и единственность решения стационарной задачи, существование и единственность слабого решения нестационарной задачи, а также его регулярность.

В работе [1] изучены свойства более простой задачи, в которой система состоит из n одинаковых теплопроводящих экранов, разделенных вакуумными прослойками, толщиной $\varepsilon = 1/n$. Задача, рассматриваемая в настоящей работе, является, в некотором смысле, обобщением задачи, исследованной в [1].

В работе [2] предложены специальные дискретные и асимптотические аппроксимации рассматриваемой задачи, приведены результаты вычислительных экспериментов

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект — FSWF-2023-0012).

Литература

1. **Amosov A.A.** Nonstationary radiative-conductive heat transfer problem in a periodic system of grey heat shields // Journal of Mathematical Sciences. — Марчук Г.И. Введение в проекционно-сеточные методы, 1981.
2. **Зигель Р.** Теплообмен излучением, 1975.

А.Ю. Федотова, студ.;
 рук. Н.Е. Крымов, к.ф.-м.н. (НИУ МЭИ, Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СТЕРЖНЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Рассматривается краевая задача, описывающая радиационно-кондуктивный теплообмен в абсолютно черном металлическом стержне круглого сечения:

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}(\lambda \nabla u) &= f, & x \in G, \\ \lambda \frac{\partial u}{\partial n} + u^4 &= g, & x \in \partial G. \end{aligned}$$

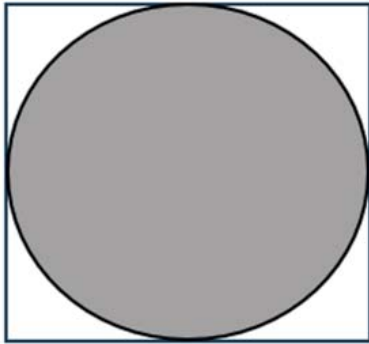


Рис. 1.

Искомой величиной является абсолютная температура $u(x)$, определенная в сечении стержня G единичного радиуса (рис. 1). Здесь λ — коэффициент теплопроводности; f — заданная функция источников или стоков тепла внутри стержня; u^4 — плотность потока теплового излучения; g — заданная функция внешних источников тепла.

Рассматриваемая задача решается с помощью метода конечных элементов. В качестве конечных элементов используются кусочно-линейные функции, определённые на сетке из равносторонних треугольников, генерируемой автоматически. Полученная система уравнений решается методом Ньютона-Крылова с использованием BiCGStab.

Метод программно реализован. Проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие работоспособность метода.

Литература

1. Марчук Г.И. Введение в проекционно-сеточные методы, 1981.
2. Зигель Р. Теплообмен излучением, 1975.

А.Э. Ульяненко, аспирант;
рук. М.П. Руденко, к.т.н. (ДонНТУ, Донецк)

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВУЗА И ЕГО ПОЗИЦИИ В РЕЙТИНГЕ

С учетом нынешней конкуренции среди высших учебных заведений, отраженной в государственных и международных рейтингах, появляется необходимость для их руководства в стратегическом планировании, а именно — оценке, анализе и прогнозировании различных видов деятельности, которые они осуществляют, в частности — научной. В связи с этим возникает актуальность вопроса прогнозирования их места в рейтингах.

Учитывая сложность в оценке зависимостей между различными показателями, влияющими на научную деятельность вузов [1], отсутствие достаточных статистических данных, и ряда других проблем, предлагается следующая иерархическая модель (рис. 1).

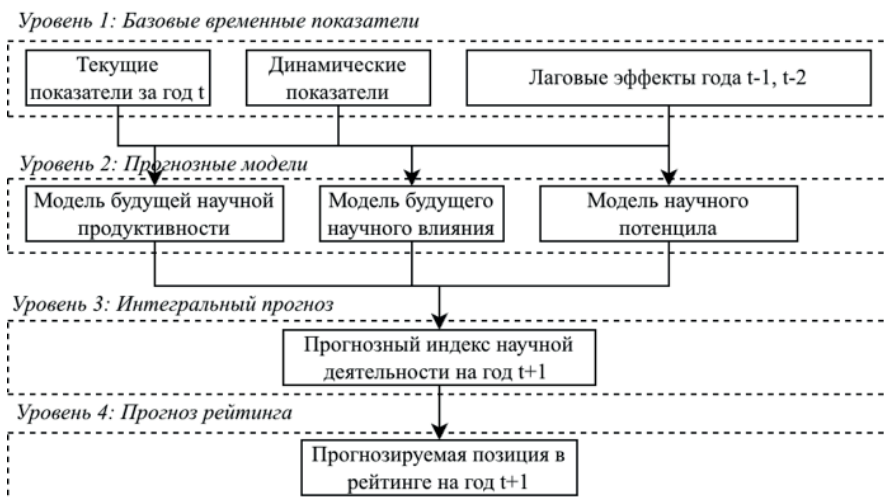


Рис. 1. Иерархическая модель прогнозирования

Данная модель включает в себя комплекс методов и математических моделей, которые будут применяться в конкретных сценариях, и позволит получить на выходе искомую прогнозируемую позицию вуза в момент времени t .

Литература

1. Три миссии университета: образование, наука, общество : Монография. Посвящается 30-летию Евразийской ассоциации университетов / Редактор В.А. Садовничий. — Москва : ООО «МАКС Пресс», 2019. — 111–124 с. — (Евразийские университеты XXI века). — ISBN 978-5-317-06083-1. — EDN LOJJDF.

А.А. Сесюкалов, студ.;
рук. А.Б. Фролов, д.т.н., проф. МЭИ, Москва

РАСШИРЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ БИБЛИОТЕКИ SAGE ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА КОМБИНАТОРНЫХ БЛОК-ДИЗАЙНОВ

Современные исследования в области комбинаторики и беспроводных сенсорных сетей требуют использования удобных и гибких инструментов для работы с блок-дизайнами, включая их построение и проверку различных свойств. Одним из таких свойств является разрешимость блок-дизайна, связанная с существованием разбиения множества блоков на параллельные классы, покрывающие множество точек без повторений. В рамках расширения возможностей математической библиотеки Sage на языке Python разработан модуль, позволяющий автоматизировать операции над блок-дизайнами, включая генерацию структур, построение отдельных блоков, проверку существования резольюций и исследование их свойств [1].

Предлагаемое расширение включает реализацию набора алгоритмов для работы с (v, k, λ) -блок-дизайнами малого порядка, поддерживает вычисление пересечений блоков, проверку условий разрешимости, построение параллельных классов. Рассматриваются два подхода к поиску резольюций — полный перебор перестановок блоков и ускоренный поиск с использованием оптимизированной проверки условий совместимости. Реализация опирается на встроенные структуры Sage и расширяет их новыми методами, специфичными для блок-дизайнов.

В докладе демонстрируются примеры работы модуля для классических семейств дизайнов: аффинных и проективных геометрий, систем троек Штейнера, эрмитовых и трансверсальных блок-дизайнов. Полученные результаты позволяют использовать разработанный инструмент как учебное и исследовательское средство, расширяющее функциональность Sage при изучении комбинаторных блок-дизайнов и их приложений [2].

Литература

1. **Frolov, N. Kochetova, A. Klyagin.** Algorithmizing Aspects of Some Combinatorial Block-Designs Implemented in Network Systems. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) Data Analytics in System Engineering. CoMeSySo 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 910. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53552-9_27
2. **Ю.В. Тараников.** Комбинаторные свойства дискретных структур и приложения в криптологии. — М.: МЦНМО, 2011.

*М.С. Чирков, студ.;
рук. А.Е. Вестфальский, к.ф.-м.н., доц. (НИУ МЭИ)*

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ

Задача вибрационной диагностики состоит в определении технического состояния оборудования и обнаружении скрытых дефектов с целью проведения раннего обслуживания и предотвращения поломок оборудования. Традиционные методы прогнозирования временных рядов часто оказываются неэффективными для задач вибрационной диагностики в силу специфики вибрационных сигналов: нестационарность, наличие нелинейной составляющей, сложных шумовых паттернов.

В связи с этим, целью данного исследования является проведение сравнительного анализа методов машинного обучения для выявления наиболее эффективных подходов к вибрационной диагностике. В работе исследуются три ключевых направления

Первым направлением исследования стало обнаружение аномалий с помощью автокодировщиков. Были исследованы архитектуры на основе CNN и LSTM, обученные на данных нормального режима эксплуатации, что решает проблему нехватки реальных примеров аварийных состояний.

Второе направление посвящено прогнозированию вибрационных сигналов. Для этого используются деревья решений, градиентный бустинг, нейросети различных архитектур (CNN, RNN, трансформеры).

Третье направление охватывает автоматическую классификацию состояний через методы кластеризации. Используются стандартные алгоритмы: K-means, DBSCAN, HDBSCAN. Для повышения качества кластеризации состояний предлагается использование методов нелинейного снижения размерности (t-SNE, UMAP)

Согласно сравнительному анализу автокодировщики демонстрируют наибольшую эффективность для детектирования аномалий при обучении на данных без аномалий. Методам прогнозирования эффективны только на коротких горизонтах, а кластеризация для качественной работы требует понижения размерности данных.

Литература

1. **Ahmad S., Salam A., Noman M.** Autoencoder-based Condition Monitoring and Anomaly Detection Method for Rotating Machines [Электронный ресурс]. — 2021. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2101.11539>
2. **Hasani R., Wang G., Grosu R.** An Automated Auto-encoder Correlation-based Health-Monitoring and Prognostic Method for Machine Bearings [Электронный ресурс]. — 2017. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1703.06272>

С.Н. Меньшенина, студ.;
рук. О.В. Шевченко, к.т.н. (НИУ МЭИ, Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ТИПА

Рассматривается начально-краевая задача для уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t \in [0, T_{max}], \quad x \in [0, X] \quad (1)$$

$$T|_{t=0} = V(x), \quad T|_{x=0} = U_1(t), \quad T|_{x=X} = U_2(t), \quad (2)$$

где $a > 0$ — заданный коэффициент температуропроводности.

Искомой величиной является функция $T(x, t)$, описывающая распределение температуры в заданной области и её изменение во времени.

Рассматриваемая задача решается с помощью метода Physics-Informed Neural Network (PINN). Искомая функция $T(x, t)$ аппроксимируется полносвязной нейронной сетью с параметрами θ : $\hat{T}(x, t; \theta)$.

Минимизируется составной функционал потерь:

$$loss = \left(\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)^2 + \sum_{\text{НУ и ГУ}} (T_{fact} - T_{calc})^2$$

где T_{fact} — заданные, T_{calc} — вычисленные значения искомой функции в точках, соответствующих начальным (НУ) и граничным (ГУ) условиям.

Для минимизации составного функционала потерь применяются стохастические оптимизаторы: Adam, AdaDelta, RMSProp, DiffPINN.

В работе представлены результаты численного моделирования для тестовых задач с известным аналитическим решением. Показано, что нейросетевая модель успешно восстанавливает распределение температуры $T(x, t)$ во всей расчётной области со средней относительной погрешностью приблизительно 1.5%.

Литература

1. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Нейросетевой подход к задачам математической физики. СПб.: Нестор-История, 2015.
2. Хайкин С. Нейронные сети. М.; СПб.: Диалектика, 2019.

С.С. Бовш, студ.; рук. О.В. Шевченко, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ОДУ ПЕРВОГО ПОРЯДКА МЕТОДАМИ ФИЗИКО-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Нейросетевые методы позволяют строить аналитические приближения решений задачи Коши без использования сеток, что исключает проблемы, связанные с дискретизацией области и адаптацией сетки к сложным границам. Это особенно полезно для задач с разрывными начальными условиями или сложной геометрией.

Физико-информированные нейронные сети (PINN) успешно применяются для решения ОДУ и УрЧП, комбинируя данные и физические законы в виде дифференциальных уравнений. В качестве аппроксимирующей функции используется многослойный персептрон, а обучение проводится на основе невязки уравнения и начальных условий.

Использование метода Adam и его модификаций (например, FastDiffPNM) обеспечивает эффективную минимизацию функции потерь, сочетая скорость сходимости и устойчивость. Это подтверждается экспериментами на тестовых функциях и при решении уравнений Навье–Стокса.

Обучение нейросетевой модели возможно на разреженных наборах точек без потери точности, что снижает вычислительные затраты по сравнению с традиционными методами (например, конечно-разностными). Это демонстрируется на примере решения уравнения теплопроводности и задачи Коши для ОДУ.

Нейросетевые модели обладают свойством универсальной аппроксимации и могут быть применены к широкому классу задач, включая уравнения с разрывными коэффициентами, задачи на нерегулярных областях и системы с неизвестными параметрами (обратные задачи).

Литература

1. **Вершинин В.Е., Пономарев Р.Ю.** Применение методов нейросетевого моделирования при решении начально-краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных // Вестник Тюменского государственного университета. 2023. Т. 9. № 3.
2. **Kingma D.P., Ba J. Adam:** A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

Е.А. Малицкий, студ.;

рук. А.М. Бирюков, к. физ-мат.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ В КЛАССАХ ЦЕЛЫХ ФУНКЦИЙ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ МЕТРИКАМИ

В работе исследуется задача Коши для системы линейных дифференциальных уравнений в комплексной области

$$\begin{aligned} u'_t(t, z) - A(t, z, D)u(t, z) &= h(t, z), \quad t \in C^1, \quad z \in C^n \\ u(t_0, z) &= \varphi(z). \end{aligned} \quad (1)$$

где $u = (u_1, \dots, u_N)$, $A(t, z, D) = (A_{ij}(t, z, D))$ — матрица линейных дифференциальных операторов по пространственным переменным z . Коэффициенты операторов предполагаются аналитическими по комплексной переменной t .

Рассматривается пространство решений, состоящее из функций, целых по z и аналитических по t , причём допускаемый тип экспоненциального роста по пространственным переменным не зависит от параметра t .

В ходе работы будут исследованы свойства функциональных пространств, в которых устанавливается разрешимость поставленной задачи (1). Формулируются условия, при выполнении которых задача Коши (1) является локально корректной в заданной шкале функциональных пространств. Для вывода этих условий задача (1) сводится к эквивалентному ей интегро-дифференциальному уравнению и доказывается, что интегральный оператор, возникающий при таком преобразовании, является сжимающим в соответствующем банаховом пространстве.

*В.В. Перлин, студ.;
рук. О.В. Шевченко, к.т.н., проф.преп. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ PINN С РАЗЛИЧНЫМИ ОПТИМИЗАТОРАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Сравнительный анализ стратегий оптимизации для физически информированных нейронных сетей

Применение специализированных оптимизаторов в PINN-архитектурах требует тщательного выбора между универсальными методами, такими как Adam, и физически-ориентированными подходами, такими как DiffPNM. Каждый из этих оптимизаторов демонстрирует различные паттерны сходимости при решении начально-краевых задач, что обусловлено их внутренними механизмами адаптации градиентов и обработки физических ограничений в функции потерь.

Особенности реализации вычислительных пайплайнов для PINN с поддержкой различных режимов точности представления данных

Разработка эффективной GPU-ориентированной реализации PINN требует комплексного подхода к управлению численной точностью, включая стратегии работы с half-precision (float16) для максимального ускорения вычислений и double-precision (float64) для критически важных операций. Такая гибкость позволяет балансировать между вычислительной эффективностью и точностью решения в зависимости от характера конкретной начально-краевой задачи.

Архитектурные аспекты распараллеливания вычислений PINN на современных CPU и GPU платформах

Перенос вычислительно интенсивных PINN-моделей с традиционных CPU-платформ на GPU требует пересмотра архитектуры вычислительного графа с учетом особенностей памяти и параллельной обработки данных. Сравнительный анализ показывает принципиальные различия в подходах к распараллеливанию операций для различных типов процессорных архитектур, что напрямую влияет на масштабируемость и производительность решения сложных физических задач.

А.В. Надежкина, студ.;
рук. Н.Е. Крымов, к.ф.-м.н. (НИУ МЭИ, Москва)

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЯВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Рассматривается начально-краевая задача для системы дифференциальных уравнений, описывающая простую эндотермическую химическую реакцию $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma C$, протекающую в тонкой трубке с непроницаемыми границами:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - q([A], [B]) + f, x \in (0, 1), t \in [0, T] \\ \frac{\partial [A]}{\partial t} &= -\alpha k(U)[A]^\alpha [B]^\beta + D_A \frac{\partial^2 [A]}{\partial x^2}, x \in (0, 1), t \in [0, T] \\ \frac{\partial [B]}{\partial t} &= -\beta k(U)[A]^\alpha [B]^\beta + D_B \frac{\partial^2 [B]}{\partial x^2}, x \in (0, 1), t \in [0, T] \\ \frac{\partial [C]}{\partial t} &= \gamma k(U)[A]^\alpha [B]^\beta + D_C \frac{\partial^2 [C]}{\partial x^2}, x \in (0, 1), t \in [0, T] \\ U(0, x) &= U_0(x), U(t, 0) = U_a(t), U(t, 1) = U_b(t), \\ [A](0, x) &= [A]_0(x), \frac{\partial [A]}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial [A]}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0, \\ [B](0, x) &= [B]_0(x), \frac{\partial [B]}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial [B]}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0, \\ [C](0, x) &= [C]_0(x), \frac{\partial [C]}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial [C]}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0.\end{aligned}$$

Искомymi величинами являются U — температура химической смеси и $[A]$, $[B]$, $[C]$ — молярные концентрации веществ, определенные в тонкой трубке единичной длины. Здесь λ — коэффициент теплопроводности смеси; D_A , D_B и D_C — коэффициенты диффузии; q — количество энергии, затрачиваемое в ходе химической реакции; k — скорость химической реакции, зависящая от температуры смеси.

Для рассматриваемой задачи была построена неявная разностная схема. Метод программно реализован. Проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие работоспособность метода.

Литература

1. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Вычислительные методы. Москва: Лань, 2014.
2. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва: Наука, 1971.
3. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику. Москва, 2006.

Д.М. Папанин, студ.;
рук. Н.Е. Крымов, к.ф.-м.н. (НИУ МЭИ, Москва)

РАЗРАБОТКА ДЕСКТОПНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ: ГЕНЕРАЦИЯ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ С ВЫВОДОМ РЕШЕНИЯ

Наша задача спроектировать программу, которая подробно показывает решения задач, встречающихся во время обучения — и самое главное, решение программы будет таким, будто задачу решал человек, причём вручную, что позволит студентам и преподавателям упростить учебный процесс, не снижая качество обучения.

Наша программа выполняет следующие задачи:

- 1) Использование MikTeX для преобразования tex-файлов в PDF-файлы в нужном количестве.
- 2) Генерирует задания по составленным алгоритмам, контролирующим сложность каждой задачи.
- 3) Работает с математическими объектами посимвольно благодаря SymPy, что позволяет получать подробное решение.
- 4) Предоставляет удобный интерфейс для взаимодействия с пользователем, используя PyQt5.

Проект даёт возможность:

- 1) Получать варианты задач в нужном количестве вместе с решениями, что экономит время преподавательского состава.
- 2) Вводить свою задачу из курса и проверять своё решение, сверяясь с полученным файлом.

В дальнейшем проект может расширяться с внедрением алгоритмов машинного обучения, добавления других предметов и прочих новшеств, образуя полноценную образовательную платформу.

Литература

1. **А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копчёнова.** Вычислительные методы: учебное пособие для вузов по специальности “Прикладная математика и информатика”.
2. **В.Н. Шакин, А.В. Загвоздкина.** Символьные математические вычисления средствами SymPy — Python.

А.А. Комлик, студ.;
рук. Н.Е. Крымов, к.ф.-м.н. (НИУ МЭИ, Москва)

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УДЗАВЫ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ СТОКСА ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Рассматривается краевая задача, описывающая течение вязкой несжимаемой жидкости при обтекании тела произвольной сложной формы с условиями прилипания на внутренней границе:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, (x, y) \in G \quad (1)$$

$$\mu \Delta u = \frac{\partial p}{\partial x}, (x, y) \in G \quad (2)$$

$$\mu \Delta v = \frac{\partial p}{\partial y}, (x, y) \in G \quad (3)$$

$$u|_{(x,y) \in \Gamma} = 0, u|_{(x,y) \in \gamma} = -u_{obj}, v|_{(x,y) \in \partial G} = 0 \quad (4)$$



Рис. 1.

Искомыми величинами являются поле скоростей u , v и давление p , определенные в области G (рис. 1). Граница состоит из двух частей: $\partial G = \Gamma \cup \gamma$, Γ — внешняя граница расчетной области; γ — граница обтекаемого тела. Здесь μ — динамическая вязкость жидкости; u_{obj} — горизонтальная скорость тела.

Рассматриваемая задача решается с помощью алгоритма Удзавы:

1. $p^0 = 0$
2.
$$\begin{cases} \mu \Delta u^{(m+1)} = \frac{\partial p^m}{\partial x}, (x, y) \in G \\ u^{(m+1)}|_{(x,y) \in \Gamma} = 0, u^{(m+1)}|_{(x,y) \in \gamma} = -u_{obj} \end{cases}$$
3.
$$\begin{cases} \mu \Delta v^{(m+1)} = \frac{\partial p^m}{\partial y}, (x, y) \in G \\ v^{(m+1)}|_{(x,y) \in \partial G} = 0 \end{cases}$$
4.
$$p^{(m+1)} = p^{(m)} - \left(\frac{\partial u^{(m+1)}}{\partial x} + \frac{\partial v^{(m+1)}}{\partial y} \right)$$

Возникающие задачи решаются с помощью метода конечных разностей.

Литература

1. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Вычислительные методы. Москва: Лань, 2014.
2. Темам Р. Уравнения Навье–Стокса: теория и численный анализ. Москва: Мир, 1981.

*К.А. Сухих, студ.; А.В. Соловьев, асп.;
рук. И.А. Косорлуков, к.т.н., доц. (СамГТУ, Самара)*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА МЕФАЗНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СЕТЯХ 0,4 КВ

Существуют различные методологические подходы к разработке технических устройств. Одним из наиболее эффективных является метод математического моделирования.

Данный метод предполагает формализацию знаний об исследуемой системе посредством построения математической модели, включающей уравнения, функции и графы. В процессе моделирования осуществляется абстрагирование от второстепенных характеристик и выделение ключевых параметров и взаимосвязей, определяющих поведение системы. Полученная математическая модель используется для проведения вычислительных экспериментов, анализа, прогнозирования характеристик системы-оригинала и верификации гипотез в условиях, когда проведение натурных экспериментов затруднено или экономически нецелесообразно.

При разработке устройства межфазного перераспределения мощности для однофазных потребителей в сетях низкого напряжения (0,4 кВ) была применена методология математического моделирования. В рамках данного исследования акцент сделан на представлении принципов построения математической модели рассматриваемого устройства, с детальным описанием процесса формализации его функционирования. Особое внимание уделено разработке алгоритма перераспределения активной мощности между фазами, в основе которого лежит булева алгебра, позволяющая оптимизировать процесс принятия решений в условиях дискретных состояний коммутационных элементов.

Разработанное математическое описание может служить основой для дальнейшей разработки программного обеспечения и моделирования специализированных устройств на базе логических элементов.

Литература

1. **Коньшева Л.К., Слесарев Г.** Логика: учебное пособие. Екатеринбург: Екатеринбургская духовная семинария, 2017. 158 с.
2. **Прокопенко Н.Ю.** Дискретная математика: учебное пособие. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. — 251 с.
3. **Поттосин Ю.В.** Дискретная математика и теория проектирования цифровых устройств и систем. Минск: БГУИР, 2007. — 180 с.

К.А. Прохожаев, студ.;
рук. Н.Е. Крымов, к.ф.-м.н. (НИУ МЭИ, Москва)

РАЗРАБОТКА СЕРВИСА ОНЛАЙН-ТЕСТИРОВАНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ

Современные образовательные процессы требуют внедрения автоматизированных решений для повышения качества и скорости обучения. Основной целью данной работы является создание платформы для онлайн-тестирования, ориентированной на работу с математическими заданиями, включая использование LaTeX для ввода и отображения формул.

Разрабатываемый сервис обладает следующими ключевыми функциями:

1. **Редактор с поддержкой LaTeX.** Пользователи могут вводить математические формулы с мгновенным отображением результата. Это упрощает проверку корректности записи и позволяет избегать ошибок форматирования.
2. **Составление тестов.** Платформа поддерживает различные типы заданий: выбор правильного ответа, ввод числовых и текстовых данных, а также полные решения. Преподаватели могут создавать тесты с текстами, формулами и изображениями.
3. **Автопроверка результатов.** Система автоматически проверяет ответы студентов, сравнивая их с эталонными. Для текстовых задач реализована поддержка синонимов и алгоритмов анализа орфографических ошибок.

Система предоставляет преимущества для преподавателей и студентов:

- Преподаватели получают удобный инструмент для составления тестов, анализа статистики ответов и индивидуальных достижений студентов.
- Студенты могут выполнять задания в удобной цифровой форме с возможностью проверки решения в реальном времени.

Литература

1. Джефф Форсье, Пол Биссекс, Уэсли Дж. Чан. Django. Разработка веб-приложений на Python.

*И.Ф. Кулаков, аспирант;
рук. А.П. Дубень, к.ф.-м.н., с.н.с. (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)*

О ВЫЧИСЛЕНИИ ТЕНЗОРНЫХ ИНВАРИАНТОВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРОИЗВОЛЬНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Инварианты тензора скорости деформации, завихренности и их различные комбинации повсеместно применяются для расчета турбулентных течений с помощью подходов, отличных от прямого численного моделирования. Они включают как модели, основанные на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), так и подсеточные модели для вихреразрешающего моделирования — моделирование крупных вихрей (LES). В том или ином коде, реализующем данные методы, возможны различные способы вычисления тензорных инвариантов в узлах или в центрах элементов (контрольных объемах) расчетной сетки.

В докладе будут рассмотрены различные способы вычисления тензорных инвариантов на смешанных неструктурированных сетках в рамках газодинамического кода NOISEtte [1], разрабатываемого в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для решения задач аэродинамики и аэроакустики. В основе NOISEtte — конечно-объемный вершинно-центрированный вычислительный алгоритм. В докладе будут продемонстрированы результаты расчетов модельных задач, представляющих собой канонические турбулентные течения, в частности затухание изотропной однородной турбулентности и развитое турбулентное течение в плоском канале. На основе полученных результатов будет проведен анализ зависимости получаемых результатов от способа вычисления тензорных инвариантов.

Литература

1. I.V. Abalakin, P.A. Bakhvalov, V.G. Bobkov, A.P. Duben, A.V. Gorobets, T.K. Kozubskaya, P.V. Rodionov, N.S. Zhdanova. *NOISEtte CFD&CAA Supercomputer Code for Research and Applications* // *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2024, 11(2), 78–101, DOI:10.14529/jsfi240206

Ю.А. Якубовская, асп.;
рук. В.В. Карабчевский, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

ГЕНЕРАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ПО ОДНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТ ГЛУБИНЫ

Генерация трехмерных моделей по единственному изображению является достаточно приоритетной задачей в контексте сохранения культурного наследия. Цифровизация памятников истории и архитектуры позволяет создать их математические модели и обеспечить возможность виртуального доступа и образовательного использования.

Предлагается подход, сочетающий глубокое обучение для построения карты глубины и классические методы обратной проекции и триангуляции для построения полигональной модели. Ключевым элементом в подобного рода системах является карта глубины, от качества построения которой зависит точность полученной модели [1].

Для получения карты глубины предлагается использовать предобученную свёрточную нейронную сеть MiDaS [2], которая принимает на вход изображение произвольного разрешения и выдаёт нормализованную карту глубины. Для восстановления метрической глубины применено аффинное преобразование (1):

$$D(u, v) = a \cdot \widehat{D}(u, v) + b, \quad (1)$$

где коэффициенты **a**, **b** задаются по априорным знаниям о масштабе сцены или эвристически.

После получения карты глубины выполняется обратная проекция всех точек в трехмерное пространство на основе внутренней матрицы **K** (2):

$$X(u, v) = D(u, v) \cdot K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Полученное облако точек обрабатывается статистическим фильтром, а затем происходит построение замкнутой полигональной модели.

Литература

1. Гадасин Д.В., Шведов А.В., Кузин И.А. Трехмерная реконструкция объекта по одному изображению с использованием глубоких свёрточных нейронных сетей // T-Comm. 2022. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/trehmernaya-rekonstruktsii-obekta-po-odnomu-izobrazheniyu-s-ispolzovaniem-glubokih-svyortochnyh-neyronnyh-setey>
2. MIDAS: MiDaS models for computing relative depth from a single image. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pytorch.org/hub/intelisl_midas_v2/

Секция 14
ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
Applied mathematics

Председатель секции: д.т.н., профессор Еремеев Александр Павлович

Секретарь секции: к.т.н., доцент Чернецов Андрей Михайлович

С.А. Задорин, асп.; рук. А.М. Чернецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА K-MEANS НА ЯЗЫКАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C И ZIG

Двадцать первый век стал периодом активного распространения интеллектуальных систем практически во всех сферах. Одной из типичных задач, стоящими перед интеллектуальными системами, является кластеризация данных — проблема автоматической группировки объектов на непустые однородные подмножества, называемые кластерами [1].

В наши дни алгоритм k-средних (англ. k-means) — один из наиболее широко используемых методов кластерного анализа данных. Этот метод, предложенный Стюартом Ллойдом для импульсно-кодовой модуляции сигналов [2], разбивает данные на k кластеров компоновкой вокруг их центров.

В настоящей работе алгоритм k-means был реализован на высокопроизводительных системных языках C и Zig, и проведено сравнительное тестирование реализаций на реальных наборах данных. Результаты тестов на объёмных данных из реального мира, включающих более 581000 объектов, показаны в таблице 1.

Таблица 1. Среднее время кластеризации в мкс на объёмных наборах данных

Набор данных	Реализация на Zig	Реализация на C
Covertypes	4262948,68	4194230,82
PokerHand	53717961,79	50748418,94
SIFT1M	853449655,63	984451532,07

Как видно из табл. 1, реализация на Zig оказалась в среднем эффективнее Си на 1,94%, что соответствует опубликованным в сети Интернет бенчмаркам [3] и результатам исследования [4].

Литература

1. **Мандель И.Д.** Кластерный анализ. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 176 с. — ISBN 5-279-00050-7.
2. **S.P. Lloyd**, “Least squares quantization in PCM,” Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, NJ, USA, Tech. Note, unpublished, 1957.
3. **Zig VS C benchmarks** [Электронный ресурс] // URL: <https://programming-language-benchmarks.vercel.app/zig-vs-c> (дата обращения: 08.07.2025).
4. **Задорин С.А.** Сравнение языков программирования C, Rust и Zig на примере решения задач из ЦОС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тридцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля — 2 марта 2024 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2024 — с. 229 — ISBN 978-5-907732-12-4.

С.А. Задорин, асп.; рук. А.М. Чернецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА K-MEANS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНЫХ РАСШИРЕНИЙ ПРОЦЕССОРА

Векторные расширения (или SIMD-расширения, от англ. Single Instruction, Multiple Data — «одиночный поток команд, множественный поток данных») — это специальные наборы инструкций в современных процессорах, которые позволяют выполнять одну и ту же операцию (арифметическую, логическую, доступа к данным и преобразования типов) одновременно над несколькими элементами данных, что ускоряет вычисления, где требуется обрабатывать большие массивы однотипной информации [1].

В данной работе метод кластеризации k-means, основанный на итеративном пересчете центров объектов и их разбиения, был реализован на современном языке программирования Zig с использованием SIMD-расширений. Были распараллелены функция для вычисления расстояния между объектами и пересчет новых центров. Проведено сравнительное тестирование реализаций на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 5700X, поддерживающим 256-битные инструкции, которые позволяют одновременно обрабатывать 4 64-битных числа. Краткие результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Среднее время кластеризации в мкс на объёмных наборах данных

Набор данных	Императивная реализация	Реализация с SIMD
Coverttype	4262948,68	2277357,58
PokerHand	53717961,79	47754515,98
SIFT1M	853449655,63	290354005,64

Данные табл. 1 показывают, что наибольшее ускорение (2,94) получено на наборе данных SIFT1M (объекты с 128 атрибутами), тогда как наименьшее (1,13) — на наборе PokerHand (10 атрибутов). Среднее значение ускорения составило 1,98 при теоретически возможном 4,00. Кроме того, при оценке эффективности распараллеливания стоит учесть, что современные компиляторы оптимизируют простые циклы, вызовы memset, memсru и т.п., используя доступные векторные расширения, что повысило производительность императивной реализации метода k-means.

Литература

1. R. Robey, Y. Zamora, Parallel and High Performance Computing. Manning, 2021.

С.В. Масюченко, студ.; рук. А.О. Щирий, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕКОВ МОД НА ИОНОГРАММАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Автоматизация обработки ионограмм радиозондирования ионосферы крайне важна как в оперативной диагностике ионосферы и ионосферных радиолиний, так и для обработки больших массивов архивных данных ионограмм с целью поиска скрытых закономерностей, редких событий, построения предиктивных моделей. Важнейшим необходимым этапом такой автоматизации является автоматическое выделение треков мод радиосигнала на ионограмме [1]. В данной работе предлагается подход с использованием современных методов машинного обучения, а конкретно — методов сегментации изображений и классификации.

В данной работе проведено сравнительное исследование различных современных архитектур нейронных сетей для сегментации изображений, с целью определения наиболее эффективного подхода к выделению и классификации треков на ионограммах наклонного зондирования. В качестве базовой точки отсчёта используется модель Mask R-CNN (maskrcnn_resnet50_fpn), дообученная на наборе из 200 размеченных вручную ионограмм, полученных на радиолиниях Хабаровск–Йошкар-Ола, Магадан–Йошкар-Ола, Норильск–Йошкар-Ола, Усолье–Йошкар-Ола, Кипр–Йошкар-Ола и Кипр–Москва (Троицк). В разметке выделялись три класса треков: нижние, верхние и неопределённые. Текущая реализация Mask R-CNN показала следующие результаты на тестовой выборке: $mAP@50 = 0.561$, $mAP(IoU\ 0.5:0.95) = 0.234$, $mAR@100 = 0.357$, что свидетельствует о хорошей способности модели к классификации треков, но недостаточной точности их попиксельного восстановления. Вместе с тем, для решаемой задачи идеальное совпадение маски с эталонным треком не является критичным — важнее корректное выделение и классификация трека как объекта.

Литература

1. **Щирий А.О.** Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>

К.О. Сидоров, асп., А.А. Пермяков, студ.;
рук. И.С. Михайлов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДООБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ (PEFT)

Метод PEFT (Parameter-Efficient Fine-Tuning — параметрически эффективное дообучение) получил широкое распространение в последние годы благодаря возможности адаптировать крупные предобученные модели с минимальными ресурсными затратами и изменениями. Основной идеей PEFT является дообучение небольшой части параметров модели или добавление легковесных адаптеров, что значительно снижает вычислительные и затраты, и затраты использования памяти по сравнению с классическим полным дообучением [1].

Целью данной работы является обзор ключевых методов PEFT, их эволюции и сравнительный анализ доступных реализаций, включая современные подходы, такие как LoRA (Low-Rank Adaptation — метод низкоранговой адаптации) [2], prefix tuning (настройка префикса) [3], prompt tuning (настройка промпта) [4], и другие, а также их применение к моделям на русскоязычных данных.

В работе проведен анализ основных методик и архитектур PEFT, начиная с ранних адаптерных слоев, продолжающийся современными эффективными представлениями параметров и техникой низкоранговой адаптации. Рассмотрены работы ведущих исследовательских групп, таких как Microsoft Research, Google, Hugging Face и другие, а также проанализированы преимущества и ограничения каждого подхода в контексте практического применения на различных задачах.

В результате исследования составлен сводный обзор ключевых достижений и тенденций в области PEFT, что позволяет исследователям и практикам выбирать оптимальные методы дообучения в зависимости от доступных ресурсов и целей, способствуя более эффективному внедрению больших языковых моделей в промышленность и наукоемкие приложения.

Литература

1. **Andrey Gromov, Kushal Tirumala, Hassan Shapourian, and Paolo Gloriosio.** The Unreasonable Ineffectiveness of the Deeper Layers. 2024.
2. **Edward Hu, Yelong Shen, Phillip Wallis, Zeyuan Allen-Zhu [et al.].** LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. 2021.
3. **Xiang Lisa Li, Percy Liang.** Prefix-Tuning: Optimizing Continuous Prompts for Generation. 2021.
4. **Brian Lester, Rami Al-Rfou, Noah Constant.** The Power of Scale for Parameter-Efficient Prompt Tuning. 2021.

Д.П. Ремизов, студ.; рук. М.М. Маран, доц., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

КОНТЕКСТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ КАК ОСНОВА СИСТЕМЫ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ВЫБОРА СПОРТИВНОЙ СЕКЦИИ

Классические методы совместной фильтрации демонстрируют низкую эффективность в нишевых рекомендательных системах, где сбор первоначальных пользовательских взаимодействий крайне затруднен, поэтому в таких случаях остро стоит проблема «холодного старта» из-за разреженности матрицы «пользователь-объект» и отсутствия исторических данных в области подбора спортивных секций. Предлагаемое решение основано на применении усовершенствованной контентной фильтрации, которая оперирует формализованной моделью предметной области. Для этого было проведено исследование и разработка гибкой метрики семантического сходства, вычисляемой в многомерном пространстве признаков и адаптируемой под демографический профиль пользователя.

Модель предметной области включает в себя структурированные атрибуты секций: целевые возрастные группы, физиологические требования (рост, вес, возраст), тип вида спорта (циклический, спортивная игра, единоборство), инфраструктурные особенности секции (локация и удаленность от пользователя), оценка секции пользователями. Данный подход позволяет сформировать релевантные полуперсональные рекомендации для новых пользователей на основе их объективных физических данных, спортивных достижениях, а также локации и особенностях секций.

Задача поиска сходства состоит в оптимизации квадратичной ошибки с регуляризацией при поиске такого разложения матрицы, чтобы произведение двух матриц (пользователи-эмбединги и объекты-эмбединги) было близко к исходной матрице в тех позициях, где в исходной матрице позиции заполнены. Скалярное произведение вектора пользователя на вектор объекта в таком случае будет отражать степень заинтересованности пользователя в объекте контента.

Разработанный метод эффективно решает проблему инициализации гибридной рекомендательной системы, обеспечивая ее устойчивость на начальном этапе. Таким образом, контентная фильтрация доказала свою эффективность как стратегический компонент в задаче персонализированного подбора спортивных секций.

Литература

1. **Ким Фальк.** Рекомендательные системы на практике / пер. с англ. Д.М. Павлова, 2020.

Д.М. Чубуков, студ.; рук. М.М. Маран, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОЦЕНОК И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ В КОЛЛАБОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ

В работе рассматриваются рекомендательные алгоритмы, основой которых является поиск общих признаков между пользователями и контентом. Исследуются методы вычисления уровня сходства, основанные на бинарных и числовых данных, а также сравниваются разные функции подобия такие как, коэффициент Жаккара, коэффициент Отиаи и корреляция Пирсона. Отмечается, что от выбора функции подобия наблюдаются существенные изменения в точности прогнозирования и качестве персональных рекомендаций.

Уделяется особое внимание алгоритмам коллаборативной фильтрации, при работе которых формирование персональной рекомендации для пользователя производится на основе сходства пользователей или контента. Рассмотрены правила построения оценочных матриц, способы выбора окрестности и пути прогнозирования оценок с использованием регрессионных и классификационных алгоритмов. Выделяются преимущества и недостатки коллаборативной фильтрации.

Актуальность работы обусловлена стремительным развитием цифровых сервисов и необходимостью в повышении эффективности работы рекомендательных систем. Новизна исследования заключается в комплексном анализе функций подобия и способов формирования окрестностей. Данный подход, позволит повысить точность рекомендаций в гибридных системах.

Личный вклад автора состоит в сравнительном анализе алгоритмов прогнозирования конечных оценок, структурирование функций сходства и формулирование рекомендаций по применению алгоритмов в рекомендательных системах.

Результаты работы могут быть применены при разработке гибридных систем рекомендаций, представляющих собой объединение коллаборативных и контентных методов, что позволит повысить точность рекомендаций существенно улучшить взаимодействие пользователя с сервисом содержащим рекомендательную систему.

Литература

1. **Ким Фальк** «Рекомендательные системы на практике» (пер. с англ. Д.М. Павлова.), 2020.

А.А. Алибеков, студ.; рук. И.С. Михайлов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Актуальность обусловлена необходимостью перехода от разрозненных алгоритмов к целостным программным системам, обеспечивающим переход от реактивного к предиктивному управлению для повышения эффективности и безопасности нефтедобывающего оборудования.

Новизна заключается в разработке универсальной модульной архитектуры, которая реализует Feature Store для управления признаками временных рядов и обеспечивает динамическую конфигурацию пайплайнов обработки данных. Архитектура позволяет комбинировать статистические методы и машинное обучение, поддерживает онлайн-обучение и гибко настраивается под различные типы оборудования без перепроектирования системы.

Личный вклад автора включает проектирование архитектуры, разработку ключевых программных модулей и протоколов их взаимодействия, реализацию механизмов обеспечения воспроизводимости экспериментов и версионирования моделей, а также создание подсистемы для обработки нестационарных промышленных данных.

Перспективы использования полученных результатов связаны с внедрением системы на облачной или edge-инфраструктуре нефтедобывающих активов для мониторинга широкого спектра критических параметров в реальном времени. Разработанная архитектура служит основой для создания элементов цифрового двойника скважинного оборудования, обеспечивая переход к проактивному управлению добычей. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию с системами автоматического управления технологическими процессами, что позволит реализовать замкнутый контур предиктивного регулирования. Кроме того, предлагаемое решение может быть адаптировано для других видов промышленного оборудования, требующих непрерывного мониторинга и прогнозной аналитики.

Литература

1. **Шлыков С.В.** Применение методов машинного обучения для автоматизации процессов в нефтегазовой отрасли // Цифровая трансформация. 2023. № 4. С. 45–58.
2. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-mashinnogo-obucheniya-dlya-avtomatizatsii-protsessov-v-neftegazovoy-otrasli/viewer>

И.С. Василев, студ.; рук. А.В. Сергеев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

СТЕГОАНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В настоящей работе рассматриваются методы обнаружения скрытой информации в цифровых изображениях типа jpeg, bmp, png на основе глубоких нейронных сетей. Анализируются архитектуры, реализованные в проектах с открытым исходным кодом: Steganalysis-ml [1], Steganography-GANs [2], которые включают свёрточные нейронные сети (CNN) и генеративно-состязательные сети (GAN), а также классические и современные подходы — от Xu-Net и SRNet до легких моделей на основе EfficientNet. Исследуется эффективность моделей при решении задачи бинарной классификации: определение наличия скрытых контейнеров данных, внедренных различными методами.

Актуальность работы обусловлена широким применением стеганографических методов внедрения информации в киберпреступности, включая утечку конфиденциальной информации и обход систем мониторинга. Новизна исследования заключается в сравнительном анализе существующих архитектур нейронных сетей для задачи бинарной классификации.

Личный вклад автора состоит в проведении сравнительного анализа эффективности различных подходов и архитектур на стандартных датасетах, а также в предоставлении рекомендаций для повышения обобщающей способности моделей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Полученные результаты могут использоваться в системах цифровой защиты и электронного документооборота для выявления скрытых каналов передачи данных. Результаты могут также послужить основой для дальнейших исследований в области ИИ в стегоанализе и разработке устойчивых к атакам обманных стегосхем.

Ключевые слова: стегоанализ, нейронные сети, цифровые изображения, задача бинарной классификации, кибербезопасность.

Литература

1. **Steganalysis-ml** // github URL: <https://github.com/ouahbi13/steganalysis-ml> (дата обращения: 18.10.2025).
2. **Steganography_GANs** // github URL: https://github.com/gargakash/Steganography_GANs (дата обращения: 19.10.2025).

Г.С. Чернышев, студ.; рук. И.С. Кружилов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ФОТОРЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОКУМЕНТОВ

Актуальной задачей в области компьютерного зрения является создание качественных наборов данных для обучения нейронных сетей. Особенно это важно для таких прикладных задач, как сегментация документов и распознавание текста, где модель должна корректно работать с изображениями, имеющими реальные искажения, например, помятую бумагу.

В рамках данной работы была поставлена цель — разработать метод автоматической генерации фотореалистичных изображений документов с подобными искажениями. В качестве основного решения был выбран подход на основе 3D-рендеринга, как обеспечивающий высокий контроль над процессом и позволяющий создавать разнообразные и при этом реалистичные сцены без необходимости ручной фотосъемки.

Для решения задачи в среде Blender с использованием его Python API был реализован автоматизированный процесс генерации. Ключевыми этапами стали: создание реалистичных деформаций бумаги за счет управления вершинами ее полигональной сетки, интеллектуальное позиционирование камеры для имитации съемки с рук и настройка вариативного освещения. На финальном этапе на объекты накладываются пользовательские текстуры документа и фона, после чего выполняется рендеринг.

Практическая ценность работы заключается в предоставлении исследователям и разработчикам инструмента для создания синтетических датасетов. Эти датасеты могут быть использованы для обучения и тестирования нейронных сетей, решающих задачи поиска границ документа, сегментации его структуры и распознавания текста в сложных условиях. Таким образом, работа вносит вклад в решение проблемы нехватки размеченных данных и ускоряет разработку алгоритмов машинного зрения для оцифровки документов.

Литература

1. **Bonnet C., Talarmain M., Ghanmi N., Chiron G., Biswas S., Awal A.M., Ramos Terrades O.** Синтетический набор данных удостоверений личности и проездных документов [Synthetic dataset of ID and Travel Documents] // Lladós J., Lopresti D., Uchida S. (eds.) Document Analysis and Recognition — ICDAR 2023: труды 17-й Международной конференции по анализу и распознаванию документов.

Г.С. Чернышев, студ.; рук. И.С. Кружилов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ДВУХЭТАПНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦИФРОВКИ ДОКУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Актуальной задачей в области компьютерного зрения является разработка эффективных методов автоматической оцифровки документов, снятых в неконтролируемых условиях. Такие изображения часто содержат перспективные искажения, деформации бумаги и артефакты освещения, что существенно затрудняет их дальнейшее использование.

Целью данной работы стало создание комплексного решения для сегментации и восстановления документов на фотографиях. В качестве основного метода была предложена каскадная архитектура на основе двух нейросетевых моделей, последовательно решающих задачи выделения контура документа и коррекции искажений.

Для решения поставленной задачи была разработана двухэтапная система. На первом этапе модель U-Net, обученная на синтетических данных с добавлением ограниченного набора реальных фотографий, выполняет точную сегментацию документа, отделяя его от фона. На втором этапе еще одна модель U-Net принимает результат сегментации и обучается устранять перспективные искажения и деформации, восстанавливая исходный вид документа. Обучение второй модели проводилось на парах «искаженное изображение — исходный документ», что позволило эффективно настроить преобразование.

Практическая ценность работы заключается в создании прототипа системы оцифровки, способной работать в условиях ограниченного количества размеченных реальных данных. Предложенный подход демонстрирует эффективность использования синтетических данных для обучения и преимущества разделения сложной задачи на последовательные этапы обработки. Разработанное решение применимо для автоматизации оцифровки документов в различных организациях.

Литература

1. **Bonnet C., Talarmain M., Ghanmi N., Chiron G., Biswas S., Awal A.M., Ramos Terrades O.** Синтетический набор данных удостоверений личности и проездных документов [Synthetic dataset of ID and Travel Documents] // ICDAR 2023: труды 17-й Международной конференции по анализу и распознаванию документов.
2. **Verhoeven F., Magne T., Sorkine-Hornung O.** UVDoc: развертывание документов на основе нейросетевой сетки [UVDoc: Neural grid-based document unwarping] // ICCV 2023: труды Международной конференции по компьютерному зрению.

В.О. Мозговой, студ.; рук. И.А. Воробьева, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДЕЛИ RESNET50 ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖИВОТНЫХ

Автоматическая классификация изображений является ключевой задачей компьютерного зрения, однако практическое применение моделей часто сталкивается с проблемой доменного сдвига, когда данные в эксплуатации отличаются от обучающих.

В работе проводится экспериментальное исследование обобщающей способности заранее обученной модели ResNet50 для классификации изображений пяти видов животных (кошки, собаки, лошади, львы, слоны). Основное внимание уделено анализу устойчивости модели к изменению распределения данных. Модель обучалась и тестировалась на двух наборах данных, взятых из открытого доступа [1], при этом второй представлял собой выборку из другого источника [2] с отличающимся паттерном изображений.

Результаты показали, что, несмотря на высокую точность на данных, близких к обучающим (dataset 1: точность классификации ~94%), производительность модели резко снижается на данных с другим распределением (dataset 2: точность классификации ~58%). Исследовано влияние увеличения количества эпох обучения (15 и 50) и применения регуляризации на обобщающую способность. Установлено, что ни один из этих методов не привел к значительному улучшению переносимости модели, особенно для классов «кошки» и «собаки», точность для которых упала до 5–16%.

Полученные результаты подчеркивают критическую важность тестирования моделей на данных с различным распределением и необходимость разработки специализированных методов аугментации и сбора данных для повышения обобщающей способности моделей компьютерного зрения, а также задают направления для новых исследований, включая применение методов трансферного обучения, ориентированных на проблемные классы, и разработку моделей с механизмами автоматической адаптации к стилю входных изображений.

Литература

1. **Benedetti A.** Набор данных для классификации животных. [URL: <https://www.kaggle.com/datasets/antobenedetti/animals/data>] // 2023.
2. **Khalequzzaman S.L.** Набор данных для классификации животных другого домена. [URL: <https://www.kaggle.com/datasets/likhon148/animal-data>] // 2023.

Н.С. Бегунов, студ.;
рук. А.В. Кожевников, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ СТОИМОСТИ РЕМОНТА ПО КАСКО

Автоматизация и повышение точности оценки страховых убытков в сегменте КАСКО критичны как для оперативного урегулирования, так и для корректного формирования резервов. Современные ML-подходы превосходят традиционные агрегированные методы за счёт учёта нелинейных зависимостей между характеристиками ДТП, ТС, полиса и историей обращений; при этом для промышленного применения важны объяснимость решений и соответствие регуляторным требованиям. Это мотивирует исследование моделей для прогноза стоимости ремонта как ключевого элемента актуарных расчётов и урегулирования убытков.

В работе сопоставляются линейные модели (GLM), деревья решений и ансамбли (Random Forest), градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM, CatBoost) и нейронные сети на табличных данных страхования. В качестве факторов используются характеристики ТС, параметры полиса, сведения о водителях, контекст происшествия и история убытков; качество предлагается оценивать по MAE/RMSE (и, при необходимости, MAPE), дополнительно применяя методы интерпретации (например, SHAP) и контроль временных срезов для борьбы с утечками и переобучением. Ожидается, что бустинговые алгоритмы — прежде всего CatBoost — обеспечат лучший баланс точности и практической прозрачности благодаря нативной работе с категориальными признаками и встроенным средствам анализа влияния факторов.

Практическая значимость подтверждается отраслевыми кейсами применения компьютерного зрения и ML у международных страховщиков (ускорение оценки повреждений по фото, снижение цикла урегулирования и трудозатрат экспертов); результаты исследования могут лечь в основу прототипа сервиса прогнозирования стоимости ремонта, интегрируемого в контур урегулирования КАСКО и формирования резервов.

Литература

1. De Virgilis M., Lupton D., McGrath L., Qazvini M., Roby S., Vernon L. Machine Learning in Insurance // Casualty Actuarial Society E-Forum. — Winter 2022. — С. 1–16. URL: https://www.casact.org/sites/default/files/2022-03/01_Winter-Eforum-2022-ML_in_Insurance.pdf (дата обращения: 20.10.2025).

Л.А. Катаниди, студ.; рук. А.О. Щирий, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРЕДОБРАБОТКА АВСТРАЛИЙСКИХ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Вертикальное зондирование (ВЗ) ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) крайне важно для исследований процессов в ионосферной плазме. Ионограмма ВЗ представляет собой зависимость амплитуды радиосигнала от рабочей частоты и высоты отражения. Важнейшим этапом автоматизации обработки ионограмм является автоматическое выделение треков мод радиосигнала [1]. В докладе показано решение задач загрузки и предобработки данных с австралийской сети ВЗ [2] с целью дальнейшего построения нейросетевых моделей выделения полезного сигнала. Привлекательность работы с указанным австралийским архивом обусловлена тем, что кроме исходных ионограмм, доступны также соответствующие очищенные (CLEAN) ионограммы, фактически архив является размеченным датасетом. Пока рассмотрена работа с исходными («сырыми», raw) ионограммами только в формате 5D, и очищенными ионограммами в другом специфическом формате [2]. Эти форматы имеют общие черты — файл состоит из трех основных частей: заголовка, списка частотных каналов и массивов амплитуд для каждого из частотных каналов. Основные различия форматов в том, что в 5D хранятся отдельные массивы амплитуд для O и X компонент сигнала, при этом данные не сжаты, а в CLEAN разделение на O и X отсутствует, массив единый, при этом массив закодирован для сжатия особым алгоритмом.

Просмотр данных CLEAN ионограмм показал, что кроме треков мод сигнала на ионограммах имеются остаточные шумы, поэтому нами производится дополнительная очистка, которая включает: пороговую фильтрацию по амплитуде, морфологическое сглаживание треков мод и удаление мелких шумовых объектов. Все указанные функции реализованы на языке программирования Python с использованием стандартных библиотек. Задачами дальнейших работ является обучение на полученном датасете нейросетевых моделей. Первые опыты с нейросетевой гибридной моделью U-Net + Mamba показали обнадеживающие результаты.

Литература

1. **Щирий А.О.** Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014. Т. 14. № 5. с. 170–173.
2. Australian Government — Bureau of Meteorology, Space Weather Services. Ionospheric data archive. URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive/ (дата обращения 01.11.2025)

А.Н. Сингин, асп.; рук. А.О. Щирий, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Радиозондирование ионосферы крайне важно для исследований процессов в ионосферной плазме. Результат радиозондирования чаще всего представляется в виде ионограммы. Синтез ионограмм при помощи искусственных нейронных сетей (ИНС) актуален в связи с потребностью в уточнении существующих моделей ионосферы и создании синтетических выборок, в том числе для задачи текстовой интерпретации ионограмм.

В контексте глубокого обучения подобная задача называется условной генерацией изображения. Условием выступает вектор метаданных, представленный физическими и пространственно-временными характеристиками сеанса радиозондирования. Целевым изображением выступает монохромная ионограмма, полученная в той же сессии. В совокупности данные формируют обучающую выборку, представленную в специальном формате [1]. Существует множество архитектур генеративных ИНС для задачи синтеза изображений. Выбор конкретной зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить: доступные вычислительные ресурсы и ожидаемый потолок качества изображения. Условная генеративно-сопоставительная сеть (УГСС/CGAN) [2] может выступать в роли первого приближения для достижения приемлемого с визуальной точки зрения качества синтезируемых изображений. Также она предполагает возможность управления генерацией, путем интеграции условного вектора в процесс. Классическая реализация архитектуры [2] недостаточна для получения визуально схожих результатов. В ходе экспериментов большинство составляющих её модулей были заменены на актуальные альтернативы. Что позволило подтвердить принципиальную возможность синтеза ионограмм данной архитектурой.

Задачей дальнейших исследований является подбор ключевых особенностей конфигурации CGAN, среди которых: соотношение размеров генератора и дискриминатора, скорости обучения каждого из них и компонент функции потерь генератора.

Литература

1. **Щирий А.О.** Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолоний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
2. **Mirza M., Osindero S.** Conditional Generative Adversarial Nets // *arXiv* [электронный ресурс]. — 2014. — DOI: 10.48550/arXiv.1411.1784

И.А. Бортников, студ.; рук. А.Д. Баринов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПАТОЛОГИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ СНИМКОВ МРТ

Существующие автоматизированные системы часто недостаточно точны или требуют больших вычислительных ресурсов, что ограничивает их практическое применение.

Целью исследования является разработка и обучение сверточной нейронной сети для автоматической классификации патологий головного мозга на основе МРТ-снимков

Сверточная нейронная сеть принимает входные данные, потом выделяет из изображения признаки и создает карты признаков в виде матрицы данных. После матрица сглаживается в вектор и слои нейронов на основе признаков классифицируют изображения. Обучается сверточная нейронная сеть «с учителем» по обучающей выборке (Train). Потом идет проверка (Validation) по оставшейся выборке.

Датасет [1] содержит 7023 изображения МРТ человеческого мозга, которые классифицируются на 4 класса: глиома — менигиома — без опухоли и гипопиз. Обучающая выборка составила 5712 изображений, а тестовая 1311.

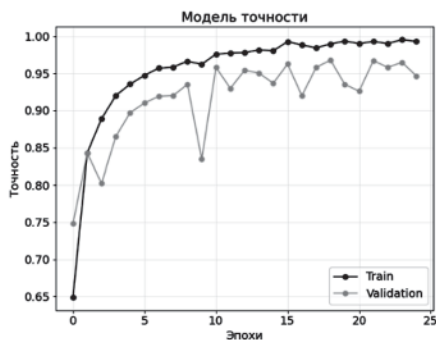


Рис. 1. Результаты точности модели

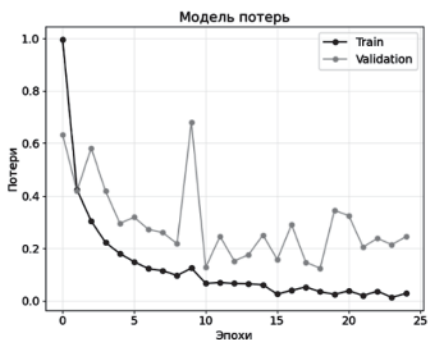


Рис. 2. Результаты потерь модели

Таким образом применение сверточных нейронных сетей для анализа медицинских изображений позволяет достигнуть высокой точности классификации патологий головного мозга, превышающей 90%.

Литература

1. Brain Tumor MRI Dataset / Kaggle [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>

Мин Со Хтет, асп.; рук. А.М. Чернецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ ГРАДИЕНТОВ ДЛЯ РАЗРЕЖЕННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MPI И EIGEN API

Современные научные расчеты требуют решения систем линейных уравнений с матрицами размерностью порядка 10^7 – 10^9 элементов. Классические алгоритмы не справляются с такими объемами данных из-за ограничений памяти и производительности. Метод сопряженных градиентов эффективен для симметричных положительно определенных систем, но требует параллелизации для практического применения в крупномасштабных задачах.

Разработана параллельная реализация на C++ с использованием технологий MPI и библиотеки линейной алгебры Eigen. Алгоритм организует распределенное хранение блоков разреженной матрицы между процессами с применением формата сжатого хранения строк (CSR). Коммуникационные операции оптимизированы через механизмы локальных сегментов глобальных векторов и специализированное распределение данных на основе triplet-формата. Реализация обеспечивает высокую точность вычислений с критерием сходимости 10^{-12} при максимальном количестве итераций 50 000.

Разработанное решение демонстрирует устойчивую масштабируемость и значительное ускорение вычислений при увеличении количества вычислительных процессов. Система измерения производительности подтверждает эффективное распределение вычислительной нагрузки между узлами кластера. Оптимизация использования памяти и минимизация коммуникационных издержек обеспечивают решение задач ранее недоступной размерности при сохранении требуемой точности.

Полученные результаты можно практически применить в областях вычислительной физики, инженерного анализа и других научных исследованиях. Также результаты могут быть интегрированы в существующие вычислительные системы и адаптированы для работы в распределенных средах. Дальнейшее развитие предполагает реализацию гибридных схем параллелизма и расширение функциональности для работы с несимметричными системами уравнений.

Литература

1. **Воеводин Вл.В.**, Параллельные вычисления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
2. **Eigen3 API** [Электронный ресурс]: <https://libeigen.gitlab.io/eigen/docs-nightly/ConjugateGradient8source.html>

Д.А. Шпак, студ.; рук. Г.В. Ройзензон, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЕРБАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ И БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

В работе рассматриваются реализация программы автоматического решения задачи порядковой классификации многопризнаковых объектов методами вербального анализа решений, где в качестве ЛППР выступает большая языковая модель. Конкретно выбраны методы ORCLASS и его модификация STEPCLASS, а также метод CYCLE.

Уделяется особое внимание сравнению результатов классификации при изменении метода вербального анализа, языковой модели, входных инструкций на предмет обнаруженного числа противоречий и различий в решении и обеспечению транзитивности путём информирования нейронной сети о необходимости изменить выбор, если обнаружено несоответствие.

Актуальность работы обусловлена ростом применения языковых моделей в широком спектре прикладных задач, где алгоритмы, основанные на машинном обучении, могут приводить к противоречивым или нежелательным решениям. Новизна заключается в анализе практической применимости методов вербального анализа в контексте интеграции с современными архитектурами обработки естественного языка на основе трансформеров.

Личный вклад автора заключается в создании программы для автоматического построения классификации альтернатив вербальными методами с обращением к языковой модели через API. Проведён сравнительный анализ полученных решений.

Результаты работы открывают перспективу создания гибридных систем, комбинирующих качество обработки естественного языка и удобство для конечного пользователя от трансформерных архитектур с верифицируемостью и интерпретируемостью от вербальных методов. Рассматривается предоставление языковым моделям способа обращаться к внешним средствам, основанным на вербальных методах, по аналогии с уже широко используемым инструментарием взаимодействия с интерпретатором кода или поисковыми системами.

Литература

1. **О.И. Ларичев** «Свойства методов принятия решений в многокритериальных задачах индивидуального выбора» // Автомат. и телемех., 2002, № 2.

*А.П. Варшавский, С.В. Шихалеев, Ван Жунтянь, студ.;
рук. П.Р. Варшавский, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА И МАСТЕРА НАСТРОЙКИ ДЛЯ МОДУЛЯ НЕЧЁТКОГО ВЫВОДА

В работе представлена разработка пользовательского интерфейса программного модуля для построения нечётких систем, ориентированного на использование в учебных и научно-исследовательских задачах. В основе решения лежит реализованный на языке Python модуль нечёткого вывода [1, 2], интегрированный с веб-фреймворком, что обеспечивает удобный доступ к системе через Интернет-браузеры.

Базовая часть модуля включает средства задания лингвистических переменных, функций принадлежности, базы правил, дополнительных параметров нечёткого вывода и реализует основные операции нечёткой логики [3]. Особое внимание уделено пользовательскому интерфейсу. Выполнена полная русификация англоязычного интерфейса и дополнительно реализована поддержка китайского языка, включая элементы навигации, формы ввода параметров, сообщения об ошибках и встроенные подсказки. Переключение языков осуществляется динамически, а текстовые ресурсы вынесены в отдельные конфигурационные файлы для упрощения сопровождения. Интерфейс был доработан для удобства и понятности пользователям без опыта работы с нечёткими системами. Ключевым элементом разработки стал упрощённый мастер настройки (wizard) для создания нечётких систем «с нуля». Мастер пошагово проводит пользователя через основные этапы разработки: выбор структуры системы, алгоритма нечёткого вывода, задание входных и выходных переменных, настройка функций принадлежности, формирование базы правил и выбор метода дефаззификации. На каждом шаге пользователь получает краткие пояснения и рекомендации.

Разработанный интерфейс и мастер настройки делают работу с модулем нечёткого вывода удобным для студентов и начинающих исследователей, уменьшая порог входа и сокращая количество рутинных операций.

Литература

1. **P. Varshavskii, A. Sesin, M. Bashlykov** Implementation of a System for Teaching the Basics of Fuzzy Logic Inference Systems and Fuzzy Case-Based Reasoning // Inforino 2024, Moscow, Russia, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/Inforino60363.2024.10551887.
2. **Лутц М.** Изучаем Python. Том. 1, 5-е изд. М: Вильямс, 2024.
3. **Заде Л.А.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию решений. М.: Мир, 1976.

*В.В. Емец, Р.Т. Абдурахманов, студенты;
рук. П.В. Афонин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЭВРИСТИКО-ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СИНТЕЗ УЧЕБНЫХ РАСПИСАНИЙ: ПРЕОДОЛЕНИЕ NP-ТРУДНОСТИ МЕТОДАМИ ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Задача автоматизированного составления учебных расписаний является классической NP-трудной проблемой, что делает невозможным нахождение точного оптимального решения для реальных данных за приемлемое время. Традиционные подходы, основанные на жадных алгоритмах или простых эвристиках, часто оказываются неэффективными в условиях большого числа жестких ограничений и мягких критериев качества.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка и верификация гибридного подхода, сочетающего эволюционные и эвристические методы для синтеза качественных и реализуемых учебных расписаний. В работе исследуются два ключевых аспекта.

Первым направлением исследования стало построение гибкой модели ограничений. Модель формализует задачу как проблему удовлетворения ограничений, где жесткие условия являются обязательными, а мягкие — формируют целевую функцию для оптимизации.

Второе направление посвящено разработке ядра гибридного алгоритма. В его основе лежит генетический алгоритм, ответственный за глобальный поиск в пространстве решений. Для преодоления медленной сходимости классических ГА в схему интегрированы специализированные эвристики, которые выполняют локальную оптимизацию хромосом на каждом поколении, выступая в роли «интеллектуального» мутационного оператора.

Таким образом, представленный комплексный подход, объединяющий строгую модель ограничений, синергию эволюционного поиска и локальной оптимизации, а также системную верификацию, позволяет прогнозировать его высокую практическую эффективность. Ожидается, что разработанный метод сможет генерировать расписания, не только полностью соответствующие всем обязательным требованиям, но и превосходящие решения традиционных методов по ключевым показателям качества, что открывает перспективы для его успешного внедрения в образовательный процесс и снижения административной нагрузки.

Литература

1. Michalewicz, Z., & Fogel, D.B. How to Solve It: Modern Heuristics. Springer, 2004.

Мьо Хлайн Вин, асп.;
рук. И.С. Михайлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОЭНКОДЕРОВ LSTM ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Актуальность данной работы обусловлена растущей сложностью и масштабом современных промышленных систем, таких как сети нефтяных скважин, где профилактическое обслуживание и мгновенное реагирование на сбои являются экономически и экологически императивными. Существующие методы анализа временных рядов часто оказываются неэффективными при работе с реальными производственными данными, характеризующимися высокой долей шума, пропусков и нестационарностью.

Исследования заключается в разработке и практической реализации метода обнаружения аномалий в режиме реального времени на основе автоэнкодеров, адаптированного для высокоскоростных и сложных технических систем. Разработанный метод применяет ошибки реконструкции автоэнкодера не только для детектирования аномалий, но и как количественный показатель качества и согласованности данных. Высокая ошибка реконструкции интерпретируется не просто как аномалия, а как потенциальное нарушение физической или технологической согласованности между параметрами скважины. На основе этих ошибок строится дополнительное пространство признаков, которое используется для кластеризации K-means. Это позволяет выявлять не только точечные выбросы, но и целые периоды или режимы работы с повышенной «шумностью» или несогласованностью данных, что критически важно для оценки достоверности показаний датчиков. Это обеспечивает создание готового к внедрению инструмента для предиктивного мониторинга и повышения операционной эффективности нефтяных скважин.

Разработанный метод может быть эффективно применён в системах технического диагностирования, прогнозирования отказов и мониторинга состояния оборудования в реальном времени.

Литература

1. **Автоэнкодеры:** <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/how-autoencoders-works/>
2. **Иэн Гудфеллоу, Йошуа Бенжио и Аарон Курвиль:** Глубокое обучение стр. 502–504.

*О.В. Кармалина, студ.;
рук. М.Г. Городничев, к.т.н., доц. (МТУСИ, Москва)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СИНТЕЗА МАКРО- И МИКРО- ПОДХОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Современные транспортные системы сталкиваются с вызовами интенсивной урбанизации, роста автомобилизации и требованиями устойчивого развития. Математическое моделирование выступает ключевым инструментом снижения выбросов CO₂ и повышения безопасности.

Сравнительный анализ моделей транспортных потоков по точности, сложности, обобщению и применимости выявил их взаимодополняющий характер.

Микроскопические модели обеспечивают наивысшую локальную точность [2]. Они точно воспроизводят психофизические пороги и реакции водителей, однако сложны в вычислениях, а калибровка требует больших данных и приводит к переобучению. Макроскопические модели гарантируют эффективность на крупных сетях и позволяют симулировать тысячи километров в реальном времени. Калибровка аналитическая, что стирает индивидуальное поведение и вызывает физически некорректные артефакты [3]. Кинетические модели сохраняют распределение скоростей и описывают фазовые переходы, но требуют высоких вычислительных ресурсов и редких эмпирических данных. Модели машинного обучения обладают наивысшей адаптивностью: автоматическая подстройка и высокая точность на длинных горизонтах [1], однако непрозрачны и зависят от GPU и больших датасетов.

Проведённое исследование показало, что ни один из классов моделей не является универсальным, что объективно обосновывает необходимость их целенаправленного синтеза. Полученные результаты имеют прямое прикладное значение для разработки нового поколения интеллектуальных транспортных систем, стратегического градостроительства, проектирования инфраструктуры под автономный транспорт и т.д.

Литература

1. **A. Nichol, J. Schulman**, “Reptile: a Scalable Metalearning Algorithm,” ArXiv preprint arXiv:1803.02999, 2018 — P. 1–10.
2. **M. Zhua, X. Wanga, A. Tarkoc, S. Fanga**, “Modeling Car-Following on Urban Expressways in Shanghai: A Naturalistic Driving Study,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 93, 2018, P. 425–445.
3. **N. Bellomo, C. Dogbe**, “On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives,” *SIAM Rev.*, 53(3):409–463, 2011 — P. 410–428. doi:10.1137/090746677.

Секция 15
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И САПР
Computer engineering and CAD systems

Председатель секции: д.т.н., профессор Топорков Виктор Васильевич

Секретарь секции: Ключанский Александр Андреевич

Е.С. Чернюк, студ.; рук. Г.А. Бородин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ОБЛАЧНОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ

Актуальность работы обусловлена ростом потребностей в защищённых и контролируемых системах хранения данных. Собственное хранилище обеспечивает полный контроль над конфиденциальной информацией и минимизирует риски.

Для реализации поставленной задачи проведён сравнительный анализ существующих на рынке облачных хранилищ с открытым исходным кодом [1]. Показано, что существуют решения двух основных типов: готовые платформы и внутренние системы хранения — инфраструктурные решения, предоставляющие базовые услуги хранения данных, поверх которых строятся пользовательские прикладные приложения. Сделан вывод о целесообразности использования инфраструктурных решений в качестве базового блока хранения, а также о необходимости разделения самих объектов и их метаданных.

В качестве объектного хранилища было решено использовать MinIO из-за его совместимости с Amazon S3 API, а для хранения метаданных — хорошо известную реляционную СУБД MySQL. В качестве языка программирования остановились на применении Python из-за его богатой экосистемы библиотек.

Было развёрнуто локальное S3-хранилище на основе MinIO [2], создана база данных в MySQL и разработана схема для хранения метаданных. Предложен прототип серверной стороны продукта, обеспечивающий операции загрузки, чтения и удаления.

Дальнейшая работа будет направлена на реализацию полноценного REST API, разработку механизмов аутентификации и авторизации и создание WEB-интерфейса.

Литература

1. **16 лучших облачных хранилищ с открытым исходным кодом для Linux в 2024 году** [Электронный ресурс] — 2024 — URL: <https://ru.linux-console.net/?p=1268> (дата обращения: 09.11.2025)
2. **Официальная документация MinIO** [Электронный ресурс] — URL: <https://docs.min.io/community/minio-object-store> (дата обращения: 09.11.2025)

Я.Е. Белоус, студ.; рук. Г.А. Бородин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ

Современные системы компьютерного зрения сталкиваются с необходимостью обработки больших объемов видеоданных в режиме реального времени. Одной из ключевых проблем, снижающих эффективность последующего анализа видео, является нестабильность кадров, вызванная дрожанием камеры, вибрацией и другими факторами. Это актуализирует задачу разработки и исследования эффективных алгоритмов стабилизации, пригодных для работы в потоковом режиме.

В рамках данного исследования проведён анализ современных методов стабилизации видеопотока [1]. Проанализированы как классические подходы, основанные на оценке оптического потока и поиске ключевых точек (например, методы Лукаса-Канаде, Фарнебека, ORB), так и современные методы, использующие глубокое обучение. Выявлены их преимущества и недостатки применительно к стабилизации видео в реальном времени.

На основе проведенного анализа в качестве основного инструментария для реализации был выбран язык программирования Python в связке с библиотекой компьютерного зрения OpenCV. Выбор обусловлен наличием большого количества готовых библиотек и фреймворков для задач стабилизации, высокой скоростью прототипирования и наличием оптимизированных низкоуровневых реализаций многих алгоритмов.

Разработаны структурная схема и алгоритм программного конвейера стабилизации, включающий следующие основные этапы:

1. Захват и предобработка кадров (конвертация в полутоновое изображение).
2. Оценка межкадрового движения (с использованием оптического потока).
3. Сглаживание траектории движения камеры (с применением скользящего среднего).
4. Применение компенсирующего преобразования к кадру.
5. Формирование стабилизированного видеопотока.

Литература

1. **Video Stabilization:** A Comprehensive Survey from Classical Mechanics to Deep Learning Paradigms // X. Quan, H. Quan, J. Chuanxu et al. Basel: Modeling — 2025. — № 6(2). — P. 49–77.

А.Д. Семенова, асп.; рук. М.В. Фомина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБОБЩЕНИЯ К НАЛИЧИЮ ШУМА В ДАННЫХ

Одной из важных задач интеллектуального анализа данных является задача формирования обобщенных понятий, описывающих классы объектов, которые обладают похожими свойствами. Данные, которые используются алгоритмами обобщения в качестве обучающих выборок (датасетов), часто содержат шум разного типа, что негативно влияет на результаты обобщения. Для создания методов и алгоритмов, устойчивых к искажениям информации в таких данных необходимо выбрать средства, которые позволят снизить влияние шума в датасетах [1].

Был выполнен машинный эксперимент, на первом этапе которого в исходные данные вносился шум Гауссовский, импульсный, равномерный. Шум вносился: 1) во все данные; 2) в случайный атрибут или в несколько явно указанных атрибутов и 3) в решающий атрибут [2]. Искусственно зашумленные данные использовались для построения классификаторов в виде множества продукционных правил и деревьев решений, затем на тестовых выборках проверялась точность классификации. Так, было установлено, что алгоритмы обобщения наиболее устойчивы к шуму гауссовского типа. В дальнейшем планируется выполнить такое исследование для данных, представляющих временные ряды. На рис. 1 приведен пример временного ряда без шума (слева) и пример того же временного ряда с шумом (справа). На основе результатов планируется выявить дополнительные признаки и аргументы, влияющие на качество распознавания, а также дать рекомендации для повышения точности распознавания.

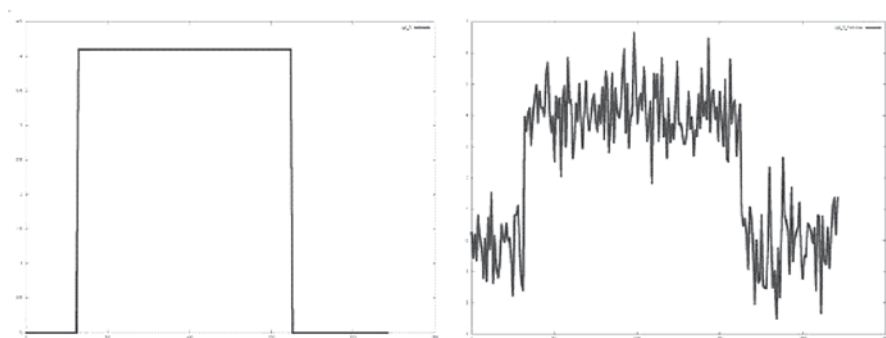


Рис. 1. Пример данных без шума (слева) и с внесенным шумом (справа)

Литература

1. Митчелл Т. Машинное обучение / Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2008. — 304 с.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Вильямс, 2016. — 1408 с.

*С.А. Дроздов, студ.;
рук. Л.А. Старостина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (ИИ)

Современная электронная промышленность характеризуется стремительным развитием и усложнением электронных устройств. Требования к размерам, повышению производительности и снижению стоимости устройств возрастают, что ставит перед инженерами всё более сложные задачи. Традиционные методы проектирования ПП, зачастую трудоёмкие и подверженные человеческим ошибкам, становятся узким местом в ускорении производственного цикла. Это актуализирует задачу применения искусственного интеллекта в процессе разработки плат, для автоматизации и оптимизации [1, 2].

В этой работе проведён анализ современных подходов к применению ИИ в области проектирования печатных плат. Исследованы методы машинного обучения, а также задачи, для которых уже предпринимаются попытки использования нейронных сетей. Выявлены их преимущества и недостатки применительно к задачам ускорения и повышения качества проектирования ПП.

На основе проведенного анализа выявлена высокая перспективность применения искусственного интеллекта для решения задач проектирования печатных плат. Установлено, что адаптивный характер ИИ-моделей позволяет им подстраиваться под специфику различных типов плат и требований к их проектированию [1]. Подтверждена теоретическая обоснованность создания интеллектуальных систем, которые могут существенно повысить эффективность, сократить время разработки и минимизировать ошибки, присущие ручному проектированию.

Литература

1. **Luukko, M.** Utilization of Artificial Intelligence in Electronics Design — Tampere: Tampere University, 2024. — 84 p.
2. **Ravikumar, H.** An Integrated Framework for Automated Testing and PCB Design Optimisation. — ResearchGate, 2024. — 10 p. — URL: https://www.researchgate.net/publication/392726973_An_Integrated_Framework_for_Automated_Testing_and_PCB_Design_Optimisation — Дата обращения: 24.11.2025.

С.И. Лойко, студ.; рук. А.А. Ключанский, ассистент (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЩЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ПОДСИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО БАНКОВСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИТИКИ СРЕДСТВАМИ SQL

Активное развитие дистанционного банковского обслуживания (ДБО) — интернет-банк, мобильные приложения, чат-боты — приводит к росту числа и разнообразия клиентских обращений [1]. Для банка важно не только оперативно отвечать клиентам, но и системно анализировать массив обращений для повышения качества сервиса и оптимизации внутренних процессов.

Объект исследования — подсистема ДБО, предмет — методы системного анализа обращений и их автоматизированной обработки на основе реляционной СУБД PostgreSQL. Цель работы — разработать подход к автоматизации аналитики обращений с использованием средств SQL (представления, хранимые процедуры, оконные функции) для формирования устойчивой «витрины данных» для аналитиков.

Выполнена классификация обращений по типам (технические, операционные, информационные, финансовые) и каналам поступления (мобильное приложение, веб, колл-центр, чат и др.) [2]. Для каждого обращения выделяются основные атрибуты (идентификатор, время, категория, приоритет, канал, статус, исполнитель, длительность решения), что позволяет рассматривать их как поток событий, пригодный для количественного анализа и мониторинга SLA [3].

Предложена SQL-ориентированная архитектура аналитического слоя: представления для агрегирования и фильтрации, хранимые процедуры для типовых отчетов (нагрузка по времени, соблюдение SLA, массовые инциденты), а также оконные функции для расчета ключевых показателей. Практическая значимость подхода заключается в снижении доли ручного труда аналитиков, повышении прозрачности метрик качества обслуживания в ДБО и создании базы для последующего внедрения BI-инструментов и моделей машинного обучения [2, 3].

Литература

1. **Аваков Н.С. и др.** Исследование и анализ использования дистанционного банковского обслуживания.
2. **Зернова Л.Е.** Банковское обслуживание физических лиц с использованием дистанционных технологий.
3. Обзор рынка дистанционного банковского обслуживания в России — ЦБ РФ, 2024. URL: <https://www.cbr.ru/crosscut/lawacts/file/2534> (дата обращения: 08.12.2025)

Секция 16
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ,
СЕТИ И СИСТЕМЫ
Computing machines, networks, and systems

Председатель секции: д.т.н., профессор Абросимов Леонид Иванович

Секретарь секции: к.т.н., доцент Орлова Маргарита Андреевна

*А.А. Вестфальская, студ.;
рук. А.Г. Гольцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАСПОЗНАВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МУЗЫКАЛЬНОЙ АУДИОИНФОРМАЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматриваемая задача решается в рамках создания электронного музыкального инструмента, принцип действия которого заключается в распознавании звучания реального струнного музыкального инструмента и преобразовании его в информацию о воспроизводимых музыкантом нотах. На вход алгоритма поступает монофонический аудиопоток (например, звук, сыгранный на одной гитарной струне) и сопутствующие шумы; распознавание одновременного звучания многих нот и инструментов не рассматривается. Вместе с тем, распознавание должно производиться в реальном времени с минимальными задержками и на основе только тех данных, которые были получены до момента распознавания. Алгоритм не имеет права «забегать вперед» и использовать информацию о том, как звучание изменится в будущем относительно момента распознавания. Предполагается, что входной поток данных поступает с АЦП, к которому подключен микрофон или звукоусилитель.

Преобразование оцифрованной аудиозаписи в ноты в режиме реального времени сопряжено с существенными трудностями: во-первых, распознавание ноты занимает время и приводит к задержкам [2], в частности, для звуков низких частот может потребоваться анализ предыдущих фрагментов записи, отстоящих во времени достаточно далеко; во-вторых, обрабатываются абсолютно все звуки, включая посторонние шумы и незначительные ошибки исполнителя [1]. Известные существующие решения имеют ряд недостатков, затрудняющих их использование в режиме реального времени: они либо слишком медленны, либо допускают значительные погрешности.

Данная работа нацелена на решение задачи создания алгоритма, достоверно преобразующего монофонический аудиопоток в ноты с задержкой, приемлемой для интерактивной игры, на основе которого возможно создание упомянутого выше электронного музыкального инструмента. Для отладочных целей используется звуковой файл, а его анализ в компьютере реализуется на языке высокого уровня.

Литература

1. Буланов, Д.А. Анализ методов распознавания и преобразования аудиоинформации в ноты / Д.А. Буданов, И.А. Харитонов // АСУ и приборы автоматики. — 2011. — № 157. — С. 78–81.
2. Преобразование Фурье в действии: точное определение частоты сигнала и выделение нот. — Текст : электронный. // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/articles/247385/> (дата обращения: 11.11.2024).

Т.В. Демидов, студ.; рук. Э.А. Челышев, асс. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ РАДАРНОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Спутниковые системы дистанционного зондирования Земли с синтезированной апертурой получили в настоящее время широкое распространение. Поэтому задача приема и обработки сигналов от таких систем становится актуальной. В то же время для эффективного синтеза алгоритмов обработки требуются данные зондирования с заранее известными свойствами. Одним из способов получения таких данных является моделирование цифровых потоков от радарных систем.

Целью работы являлась разработка программного модуля с набором настроек, позволяющих моделировать данные различных действующих радарных систем при приеме отражений от ограниченного числа целей на поверхности Земли и сохранять данные моделирования в требуемых форматах.

Математическая модель отраженного от земной поверхности сигнала была построена на основе сведений, изложенных в литературе [1–3].

Основой работы являлся синтез алгоритмов, позволяющих моделировать данные радарных систем за приемлемое время и с эффективным расходом вычислительных ресурсов.

В результате был разработан самостоятельный программный модуль, представляющий собой оконное приложение с удобным интерфейсом, имеющий графические средства визуализации результатов моделирования и промежуточных данных. Используемые алгоритмы позволяют моделировать данные радиолокационных систем в объемах, соответствующих реальным, за сравнительно короткое время. Так радиолокационное изображение размером 10^3 на 10^3 отсчетов, содержащее 100 целей, рассчитывается примерно за 40 секунд.

Литература

1. **Cumming, I.G.** Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation / I.G. Cumming, F.H. Wong Artech House Inc., 2005. — 625 p.
2. **Richards, M.A.** Fundamentals of Radar Signal Processing / M.A. Richards — New York: McGraw-Hill, 2005. — 528 p.
3. **Curlander, J.C.** Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing / J.C. Curlander, R.N. McDonough Wiley-Interscience, 1991. — 672 p.

В.Р. Савищенко, студ.; рук. А.Н. Зейн, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СЕРВИСА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЕКРЕТАМИ В МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЕ

В микросервисной архитектуре управление секретами (паролями, API-ключами, токенами) является критически важной задачей. Традиционные подходы, такие как файлы конфигурации или переменные окружения, не обеспечивают необходимого уровня безопасности и гибкости управления доступом.

В данном докладе рассматривается архитектура сервиса «*gvault*», разработанного на языке Rust [1] для централизованного управления секретами в микросервисных системах.

Ключевой особенностью является использование схемы разделения секрета Шамира [2] для защиты мастер-ключа: ключ разбивается на N частей, для разблокировки требуется минимум K частей ($K \leq N$), что обеспечивает распределенный контроль доступа и защиту от компрометации одного администратора.

Архитектура построена на трехуровневой иерархии: «*Storage*» (хранилище с двумя состояниями: «*sealed*» и «*unsealed*»), «*Topic*» (контейнер с гибкой политикой шифрования) и «*Secret*» (версионизируемая единица хранения данных).

Контроль доступа реализован через авторизацию на основе политик с трехуровневой иерархией токенов: «*root token*» для первичной инициализации, «*admin token*» для создания пользовательских токенов администраторами и «*user token*» с гранулярными правами доступа к конкретным топикам и секретам. Аутентификация использует JWT [3].

Архитектура системы хранения спроектирована с возможностью поддержки различных СУБД через абстрактный интерфейс. В текущей реализации используется MongoDB для персистентного хранения зашифрованных секретов и метаданных.

Шифрование выполняется алгоритмом AES-256-GCM с деривацией ключей через HKDF. Сервис предоставляет REST API с OpenAPI спецификацией и интегрирован с Prometheus для мониторинга.

Литература

1. **Klabnik S., Nichols C.** The Rust Programming Language. — No Starch Press, 2018.
2. **Shamir A.** How to share a secret // Communications of the ACM. — 1979. — Vol. 22, № 11. — P. 612–613.
3. **Jones M., Bradley J., Sakimura N.** JSON Web Token (JWT) // RFC 7519. — 2015. — Internet Engineering Task Force.

А.В. Красненкова, асп.;
рук. Ш.А. Оцоков, д.т.н., доц. (РТУ «МИРЭА», Москва)

АНАЛИЗ СМАРТ-КОНТРАКТА ПО ЗАПРАВКЕ НА АЗС РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Под блокчейном будем подразумевать систему распределенного реестра. Главные черты блокчейн-технологии, помимо децентрализованности, — прозрачность и неизменяемость. Указанное обстоятельство предъявляет повышенные требования к проверке правильности вносимых данных, с чем успешно справляется формальная верификация. Под формальной верификацией будем понимать строгое математическое доказательство того, что программа (или отдельные ее компоненты) соответствует её спецификации — т.е. тому, как она должна работать, согласно проекту.

В рамках блокчейна InnoChain (первого российского формально верифицированного блокчейна, см. [2]) вся верификация осуществляется с помощью HOL4 — специального автоматизированного средства для доказательства теорем (см. [1]). С помощью HOL4 был верифицирован компилятор для языка функционального программирования CakeML, на котором разрабатываются смарт-контракты для InnoChain.

На платформе InnoChain нами был разработан формально верифицированный смарт-контракт для АЗС Республики Татарстан. Мы предлагаем методологию верификации с помощью «бизнес-метрик» — формальных утверждений о семантике бизнес-процесса, а не только о корректности кода; функциональная корректность кода проверяется через дедуктивные тесты — теоремы о необходимых и достаточных условиях правильного выполнения функций смарт-контракта. Ключевые механизмы защиты, применяемые в смарт-контракте, — использование мьютексов и моделирование логики контракта детерминированным конечным автоматом — позволяют доказать отсутствие race conditions атак, в частности, reentrancy атаки. Удалось верифицировать 23 свойства: инвариантность статусов, уникальность транзакций, корректность расчётов, однократность операций и др. Все свойства доказаны автором работы. Данный контракт был включён в реестр отечественного ПО в 2023 г. (см. [3]).

Литература

1. Interactive HOL Theorem Prover. URL: <https://hol-theorem-prover.org/>
2. Merkin-Janson L.A. Rezin R.M., Vasilyev N.K. Architecture of the Formally-Verified Distributed Ledger System InnoChain // MODELING AND ANALYSIS OF INFORMATION SYSTEMS, VOL. 27, NO. 4, 2020.
3. URL: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1765540/?sphrase_id=7009601

С.И. Якименко, преп. (НИУ ВШЭ, Москва)

РАЗРАБОТКА МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КЭША В NDN

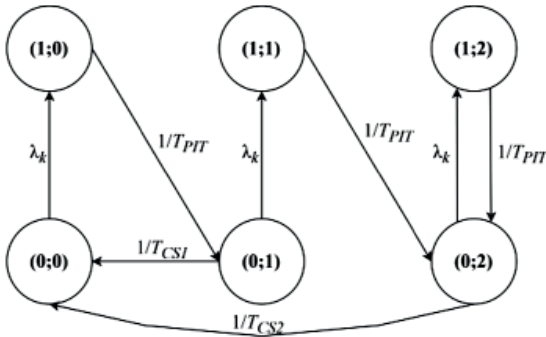


Рис. 1. Марковская модель кэша NDN (алгоритм 2-LRU)

При моделировании кэша с помощью марковских цепей в литературе принято пользоваться моделью Independent Reference Model (IRM), где каждый элемент каталога проранжирован по закону популярности (например, Ципфа), а заявки на элементы поступают как пуассоновский поток. При реалистичных значениях размеров кэша и каталога (исчисляемых

в гигабайтах) пространство состояний такой цепи очень велико, что делает численный расчет вероятностей нахождения элементов в кэше сложным. Поэтому в данной работе общий процесс запросов на кэш представлен суперпозицией независимых ON-OFF процессов, каждый из которых относится к отдельному классу контента [1].

Узел, работающий с помощью стека Named Data Networking (NDN), содержит таблицы Content Store (CS) и Pending Interest Table (PIT) для обработки пакетов. Зададим время вытеснения из таблицы PIT, виртуального и физического кэша как T_{PIT} , T_{CS1} , T_{CS2} соответственно.

Марковская модель для кэша NDN, работающего по алгоритму 2-LRU, представлена на рисунке 1. Состояние объекта, относящегося к классу k , задается парой (PIT, CS). Состояния PIT: 0 — пакет Interest отсутствует в PIT; 1 — присутствует. Состояния CS: 0 — пакет Data отсутствует в кэше; 1 — присутствует в виртуальном кэше; 2 — присутствует в физическом кэше.

С помощью моделирования получено стационарное распределение нахождения объектов в каждом состоянии для классов и в целом для системы. По результатам сделан вывод, что 2-LRU позволяет сэкономить до 20% емкости за счет размещения виртуального кэша перед физическим.

Литература

1. Quan G., Eryilmaz A., Shroff N.B. Optimal edge caching for individualized demand dynamics // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 2024. — Vol. 32. — №. 4. — P. 2826–2841.

Н.А. Соколовский, студ.;
рук. М.В. Раскатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАНЯТИЙ ФИТНЕСОМ

В современном обществе растет спрос на цифровые решения для поддержания здоровья и контроля образа жизни. Пользователи ищут сервисы, которые объединят отслеживание питания, планирование тренировок и возможность общения с тренерами в единой системе. Однако большинство существующих приложений предлагают только отдельные функции, что создает потребность в комплексных платформах.

Мною была разработана веб-платформа, которая объединяет все основные аспекты фитнес-процесса. Система включает ведение дневника питания с автоматическим подсчетом калорий, планирование тренировок через календарь занятий, а также инструменты для общения пользователей с тренерами.

Платформа построена на современных технологиях веб-разработки. Серверная часть реализована с использованием фреймворка Laravel, что обеспечивает надежную работу системы. Для хранения данных применяется база данных MySQL. Пользовательский интерфейс создан на Vue.js, что делает взаимодействие с платформой удобным и интуитивно понятным.

Ключевой особенностью системы является модульная структура, позволяющая легко добавлять новые функции. Платформа помогает пользователям анализировать их питание и физическую активность. Возможность обмена сообщениями и проведения онлайн-консультаций делает работу с тренерами более эффективной.

Тестирование системы подтвердило ее стабильную работу и удобство использования. Пользователи отметили функционал, а тренеры оценили возможности для дистанционной работы с клиентами.

Разработанная платформа представляет практический интерес для фитнес-индустрии и может использоваться как в спортивных клубах, так и для самостоятельных занятий. В будущем возможно расширение функциональности за счет разработки мобильного приложения и интеграции с популярными фитнес-трекерами.

Литература

1. **Faizrakhmanov A.** Architecture of complex web applications. Second Edition.: With examples in Laravel(PHP). — Independently published, 2024.
2. **Holmberg C., Hakansson S., Eriksson G.** Web Real-Time Communication Use Cases and Requirements. — IETF, 2015.

Э.А. Чельшев, асп.; рук. М.В. Раскатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ УРОВНЯ КРОВЯНОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ВИДЕОДАНЫМ

В настоящее время алгоритмы обработки видеоданных находят активное применения в медицине [1]. Видеозапись участка кожи человека может быть проанализирована с целью получения сведений об особенностях кровотока в данной области и определения ряда физиологических параметров, среди которых кровяное давление [2–3].

В настоящей работе предложен интеллектуальный алгоритм оценки уровня кровяного давления по видеозаписи лица человека. Данный алгоритм состоит из следующих этапов: выявление региона интереса, включающего изображение лица человека на кадре, расчет пространственных средних для ряда сегментов изображения лица, частотную фильтрацию получаемого временного ряда, а также непрерывное вейвлет-преобразование с целью генерации признакового описания данных в частотно-временной области с последующей подачей их на вход искусственной нейронной сети.

За счет выполняемой таким образом предварительной обработки данных удастся значительно сократить объем хранимых и анализируемых данных, что является крайне важным результатом в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Кроме того, это позволяет выявить частотно-временные характеристики кровотока в отдельных частях лица человека.

Сверточная нейронная сеть решает задачу многозадачного восстановления регрессии и имеет два выходных параметра: оценку систолического (верхнего) и диастолического (нижнего) давления. Оптимизация гиперпараметров искусственной нейронной сети производилась методом стохастического байесовского поиска.

Для предлагаемого алгоритма была проведена оценка по ряду метрик регрессии. Оценка алгоритма показал качество, соответствующее предъявляемым к нему требованиям.

Литература

1. Ng D., Feng M. Medical Image Recognition: An Explanation and Hands-On Example of Convolutional Networks // Leveraging Data Science for Global Health / ed. L. Celi, M. Majumder, P. Ordóñez et al. Cham, 2020. Ch. 16. P. 263–284.
2. Fedorovich A.A., Drapkina O.M., Pronko K.N. et al. Telemonitoring of capillary blood flow in the human skin: new opportunities and prospects // Clinical Practice. 2018. Vol. 15, № 2. P. 561–567.
3. Chen Y., Zhuang J., Li B. et al. Remote blood pressure estimation via the spatiotemporal mapping of facial videos // Sensors. 2023. Vol. 23. P. 2963. DOI: 10.3390/s23062963.

А. Мвамба, студ.; рук. Л.И. Абросимов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»).

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ И АДАПТИВНОГО ПАРИРОВАНИЯ УГРОЗ В АВИОНИКЕ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Быстрое развитие интеллектуальных бортовых систем и повышение уровня их связности с внешними сетями увеличивают риски кибервоздействий на авиационные системы управления [3].

Известна Система Обнаружения Вторжений и Адаптивного Парирования (СОВ-АП) [1], которая предназначена для применения в авионике и использует алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) для анализа телеметрических данных, сетевых пакетов и поведенческих паттернов в реальном времени. СОВ-АП обеспечивает адаптацию алгоритмов под динамические условия полета, минимизируя ложные срабатывания и гарантируя высокий уровень отказоустойчивости [2].

Архитектура Предлагаемой Системы (ПС) объединяет многоуровневый анализ аномалий с механизмами предиктивного моделирования угроз, что позволяет не только своевременно выявлять потенциальные вторжения, но и вырабатывать оптимальные стратегии реагирования с учетом критичности полётных систем [2].

Результаты моделирования показывают, что применение ПС значительно повышает точность обнаружения угроз в авиационных сетях по сравнению с традиционными методами, а также существенно сокращает время реакции системы на инциденты. Полученные данные были верифицированы с использованием ИИ-модели DeepSeek-R1.

Внедрение ПС способствует созданию безопасной и устойчивой киберфизической среды в современных авиационных комплексах, предоставляя проактивный ответ на ранее неизвестные векторы атак. Это соответствует международным стандартам безопасности, таким как DO-326A и EUROCAE ED-202A [3].

Литература

1. **Ким, Х., Ли, Дж., и Пак, С. (2021).** Обнаружение вторжений на основе искусственного интеллекта для авиационных систем. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, т. 57, № 4, с. 2356–2368.
2. **Чжао, Ц., и Сун, Ц. (2022).** Адаптивные механизмы киберзащиты в авиационных сетях. *Aerospace Cybersecurity Journal*, т. 3, № 2, с. 45–59.
3. **ИКАО (2020).** Стратегия кибербезопасности в авиации. Международная организация гражданской авиации (ICAO).

*Д.И. Сиденов, студ.;
рук. Л.И. Абросимов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХРАНИЛИЩА 3D-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ T-FLEX CAD

В современном машиностроении управление и хранение 3D-моделей является одной из важных задач. Проблема разрозненного хранения CAD-данных, отсутствия контроля версий и сложности совместной работы актуальна для отечественных предприятий. Анализ показывает, что инженеры-конструкторы затрачивают значимую часть времени на поиск и верификацию актуальных версий моделей.

В данный момент большинство компаний хранят данные на общем сетевом диске, что значительно затрудняет поиск необходимых компонентов для проекта. Проводник может выполнять запрос до нескольких десятков минут, особенно если используется распространенное наименование.

В работе предложено комплексное решение указанных проблем на основе гибридной архитектуры, сочетающей реляционную базу данных SQLite для метаданных и файловое хранилище для 3D-моделей. Разработаны специализированные алгоритмы управления версиями, обеспечивающие автоматическое создание новых версий при изменении моделей и ведение полной истории изменений что позволяет не потерять нужную конфигурацию модели, в случае если кому-то потребовалось ее изменить или это произошло из-за невнимательности.

Особенностью системы является глубокая интеграция с T-Flex CAD через СОМ-интерфейс, позволяющая работать с хранилищем непосредственно в среде проектирования. Реализована библиотека моделей с поддержкой Drag&Drop вставки в сборки, расширенным поиском и фильтрацией по тегам, проектам и параметрам моделей.

Данное решение снижает время на подготовку к детальному проектированию и позволяет придать более понятный и читаемый вид системе хранения.

Литература

1. Version control system of CAD documents and PLC projects | ResearchGate [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/325288940_Version_control_system_of_CAD_documents_and_PLC_projects
2. Versioning and configuration management in design using CAD and complex wrapped | ResearchGate [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0954181000000194>

Ю.С. Малкин, студ.; рук. А.С. Маковец, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Задачи компьютерного зрения, такие как распознавание лиц, критичны для систем безопасности и идентификации. Однако их реализация на устройствах с ограниченными ресурсами, таких как микроконтроллеры, представляет сложность из-за высоких вычислительных затрат традиционных нейросетевых моделей [1].

В рамках данного исследования проводится сравнительный анализ двух принципиально различных подходов к организации системы распознавания лиц. Первый, традиционный подход предполагает передачу видеопотока с камеры микроконтроллера на более мощный вычислительный узел (ПК), где осуществляется обработка данных с использованием полноразмерных нейросетевых моделей. Вторым подходом основан на реализации оптимизированных или упрощенных нейронных сетей непосредственно на микроконтроллере, что позволяет осуществлять локальную обработку видеоданных.

В результате будет проведена оценка результатов по следующим критериям: задержка обработки кадра, точность распознавания, нагрузка на сеть, потребление ресурсов [2]. А также будет выявлена зависимость между точностью распознавания и вычислительной сложностью алгоритмов.

Литература

1. **Warden, P.** Hello World: Deep Learning and Computer Vision on the Arduino [Электронный ресурс]: https://tinymmlbook.com/wp-content/uploads/2020/01/tflite_micro_preview.pdf
2. **Харинов М.В., Толстой И.М.** Проблема детектирования объектов на изображениях сцены // Экономика. Информатика. 2019. № 4.
3. TensorFlow Lite Micro [Электронный ресурс]: <https://www.tensorflow.org/lite/microcontrollers>
4. **Howard, A.** MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/316184205_MobileNets_Efficient_Convolutional_Neural_Networks_for_Mobile_Vision_Applications

*А.С. Блинов, А.Н. Русин, студенты; К.В. Латышов, асп.;
рук. В.Г. Карантаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОТОТИП ЗАЩИЩЕННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) — это компьютерные системы, которые на основе полученной информации о технологическом процессе вырабатывают управляющие воздействия на объект управления [1].

На сегодняшний день существует нормативно-правовая база, регламентирующая требования к программно-аппаратным комплексам (ПАК) для АСУ ТП [2]. Важным требованием является обеспечение защищенности как комплексного свойства, включающего информационную, функциональную и технологическую безопасность [3].

Активно развивающаяся открытая и расширяемая процессорная архитектура RISC-V представляется перспективной в качестве основы аппаратной составляющей ПАК для АСУ ТП. Однако отсутствие в отечественных операционных системах (ОС) поддержки существующих систем на кристалле в должном объеме, а также отсутствие отечественных инструментов для автоматизированной сборки ОС, актуализирует вопрос создания прототипа защищенной ОС для ПАК на базе RISC-V.

В ходе работы ядро исходного образа ОС Linux было переконфигурировано с внедрением модулей безопасности. Внесенные изменения позволили адаптировать образ ОС для применения во встраиваемых системах и повысить уровень защищенности. Полученный прототип в дальнейшем может использоваться как основа для построения ПАК, ориентированных на задачи АСУ ТП.

Литература

1. **Ефимов, С.В.** Программное обеспечение автоматизированных систем управления технологическими процессами : учебное пособие / С.В. Ефимов, М.И. Пушкарев, А.С. Фадеев; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. — 128 с.
2. О порядке перехода субъектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации на преимущественное применение доверенных программно-аппаратных комплексов...: Постановление Правительства Рос. Федерации от 14.11.2023 № 1912 // Собрание законодательства РФ. — 2023. — № 47. — Ст. 8251.
3. **ПНСТ 905-2023.** Критическая информационная инфраструктура. Доверенные программно-аппаратные комплексы. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2023. — 12 с.

Д.А. Денисов, студ.; рук. Ш.А. Оцоков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ END-TO-END ПАРАДИГМ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ: CTC И ATTENTION-BASED SEQ2SEQ

Современные end-to-end технологии автоматического распознавания речи (ASR) широко применяются в цифровых сервисах, обеспечивая быстрый перевод аудио в текст для анализа, поиска и дальнейшей обработки. Несмотря на прогресс, задача остаётся сложной: на точность влияют шумы, вариативность речи, длительные записи и ограничения вычислительных ресурсов, что снижает надёжность систем в реальных условиях.

Для повышения устойчивости и качества развиваются нейросетевые end-to-end архитектуры, среди которых ключевыми являются две парадигмы декодирования: Connectionist Temporal Classification (CTC) [1] и attention-based encoder-decoder (Seq2Seq/AED) [2]. CTC выполняет покадровое предсказание токенов с автоматическим монотонным выравниванием, а Seq2Seq использует авторегрессионный декодер с механизмом внимания и встроенным языковым контекстом, что по-разному влияет на задержку, вычислительную стоимость и точность [3].

В рамках исследования рассмотрены принципы работы и обучения моделей CTC и Seq2Seq, их функции потерь и способы декодирования, а также особенности применения в потоковых и оффлайн-сценариях. Проведено сравнение по метрикам качества (WER/CER) и производительности.

Литература

1. Graves, A., Fernández, S., Gomez, F., Schmidhuber, J. Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks // *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (ICML 2006). Pittsburgh (USA)*, 2006. P. 369–376. DOI: 10.1145/1143844.1143891.
2. Chan, W., Jaitly, N., Le, Q. V., Vinyals, O. Listen, attend and spell: a neural network for large vocabulary conversational speech recognition // arXiv preprint arXiv:1508.01211. 2015.
3. Hui J. Deep Speech, CTC, Listen, Attend and Spell (LAS). URL: <https://jonathan-hui.medium.com/speech-recognition-deep-speech-ctc-listen-attend-and-spell-d05e940e9ed1>.

О.П. Морозова, студ.; рук. М.А. Орлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ ВНУТРИ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗЬЮ УДАЛЕННЫХ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

В рамках национального проекта «Перспективные технологии для беспилотных авиационных систем» особое внимание уделяется методам передачи данных внутри группы беспилотных воздушных судов (БВС) и между удаленными объектами посредством ретрансляции информационного сигнала через БВС [1].

В данном докладе представлен обзор комплекса технологий, влияющих на выбор технологий связи с учётом всех сложностей рассматриваемого объекта. В первую очередь рассмотрены платформы, на базе которых в наиболее массовом секторе экономики разрабатываются или поставляются БВС, соответствующие следующим классам [2]: воздушные судна, мультикоптеры, квадрокоптеры, легкие дистанционно пилотируемые воздушные судна, малые беспилотные воздушные судна. Выбранный тип платформы содержит определенную аппаратную и программную базы, которые ограничивают выбор технологий каналов связи. Также тип платформы определяет механизм, частоту и особенности передачи управляющего трафика от пункта управления к каждому БВС и между БВС. Далее рассмотрены протоколы и стандарты каналов связи с их ограничениями, а также протоколы маршрутизации, используемые с данными протоколами и стандартами.

Литература

1. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Программа исследований и разработок федерального проекта «Перспективные технологии для беспилотных авиационных систем» национального проекта «Беспилотные авиационные системы». Версия 1. — М., 2024. — 31 с. Текст: электронный. — URL: (дата обращения: 25.11.2025).
2. **ГОСТ Р 57258-2016.** Система беспилотные авиационные. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации / введ. 2016-09-01. — М. : Росстандарт, 2016. — 8 с. — (ГОСТ Р 57258-2016). — Режим доступа: официальный сайт Росстандарта. — Загл. с экрана.

Е.А. Палагина, студ.; рук. А.А. Мишин, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ВЕРСИЙ HTTP-ПРОТОКОЛА НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ СЕРВЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рост объёма веб-трафика делает энергопотребление серверной инфраструктуры одной из ключевых экологических и экономических проблем современных дата-центров. Эффективность работы веб-серверов во многом определяется используемым протоколом передачи данных. Протоколы HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 существенно отличаются архитектурой взаимодействия, мультиплексирования и управлением соединениями. Это на загрузку процессора и сетевого стека, что отражается на энергопотреблении серверов [2].

В рамках исследования проводится экспериментальное сравнение энергопотребления серверного оборудования при обслуживании типичных веб-нагрузок по протоколам HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 (на базе TLS 1.3 и QUIC) [1]. Разработанный программный комплекс позволяет автоматически собирать метрики нагрузки на сервер и энергии, потребляемой серверным устройством при взаимодействии с клиентом. Сопоставление полученных данных даёт возможность оценить, в какой степени использование более современных протоколов снижает сетевые издержки и энергозатраты, а также формализовать рекомендации по оптимизации серверной инфраструктуры.

Результаты работы подтверждают практическую значимость перехода к новым версиям HTTP в целях повышения производительности веб-сервисов и уменьшения энергопотребления серверных устройств за счёт уменьшения количества TCP-соединений, устранения проблемы head-of-line blocking и сокращения процессорного времени на обработку заголовков.

Новизна работы заключается в комплексном сравнении всех трёх версий протокола в условиях, приближенных к реальным, и в использовании специализированного эмулятора веб-сервиса, полностью контролируемого исследователем.

Литература

1. **Смирнов, В.В.** Протоколы сетевого взаимодействия: теория и практика. — Санкт-Петербург: Питер, 2019. — 400 с.
2. **Franzen S.** On comparing the power usage of HTTP/1.1 and HTTP/2 on web servers: бакалаврская работа / S. Franzen. — Lisbon : NOVA University Lisbon, 2020. — 68 p. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/347523090> (дата обращения: 23.11.2025). — DOI: 10.13140/RG.2.2.31455.48808

Е.С. Желагин, студ.; рук. А.Н. Зейн, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОВЫХ БАЗ ДАННЫХ И РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: ПРЕИМУЩЕСТВА, МЕТОДЫ И АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ

В современном мире объём данных и их разнообразие постоянно увеличивается, что позволяет строить более точные и качественные рекомендательные системы для пользователей. Практически любая коммерческая компания нуждается в продвижении своего продукта, где ключевую роль играют рекомендательные алгоритмы [1]. Современные рекомендательные системы требуют более точного моделирования связей между объектами и контекстом взаимодействия. Однако, традиционные базы данных, например, векторные, оказываются ограниченными при работе со сложными взаимосвязанными структурами данных.

Цель рекомендательных систем — это предоставить пользователю максимально релевантную информацию [1]. На практике в таких системах используются векторные базы данных. В них данные хранятся в виде многомерных числовых векторов. Данный формат отлично подходит, например, для поиска смысловой схожести текста с использованием евклидовых расстояний. Но при этом подходе теряются контекстные связи, что снижает качество рекомендаций при сложных сценариях.

Графовые базы данных могут компенсировать данный недостаток, например, Neo4j позволяет представлять данные в виде узлов и связей [2], обеспечивая эффективные обходы графов, выявление сообществ, поиск соседства и так далее. Это делает возможным реализацию алгоритмов рекомендаций, основанных на контекстных связях и анализе структуры связей. Подход на основе графов дает более глубокое понимание контекста и повышает качество рекомендаций по сравнению с векторными или табличками методами.

Предлагается применить сравнительный анализ рекомендательных алгоритмов на основе графовых баз данных и векторных моделей представления данных.

Литература

1. **Фальк, К.** Рекомендательные системы на практике / К. Фальк — Москва: ДМК Пресс, 2020. — 448 с.: ил.
2. **Клеппман, М.** Высоконагруженные-приложения. Программирование, масштабирование, поддержка / М. Клеппман. — Астана: Спринт Бук, 2024. — 640 с.: ил.

*М.М. Баруздин, соискатель;
рук. М.В. Раскатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОБЪЯСНИМОСТЬ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ: ЧТО НА САМОМ ДЕЛЕ “ВИДИТ” CLIP

Мультимодальные модели, такие как CLIP, демонстрируют высокую эффективность в задачах сопоставления изображений и текстовых описаний, zero-shot классификации и мультимодального поиска [1]. Однако при практическом использовании такие модели остаются существенно непрозрачными: неясно, какие визуальные признаки и какие языковые элементы определяют итоговое решение, как распределяется вклад различных модальностей и насколько устойчивы эти объяснения к изменению входных данных.

В рамках данной работы предлагается комплексное исследование механизмов визуально-текстовой атрибуции на примере модели CLIP. В работе объединены несколько подходов к объяснимости: градиентные методы [2], пертурбационные методы, анализ embedding-пространства [3] и оценку faithfulness с помощью метрик insertion/deletion и sufficiency/comprehensiveness [2]. Такой подход позволяет систематически оценить, как именно модель выделяет релевантные области на изображении, какие токены текста оказывают наибольший вклад в итоговый коэффициент сходства и как модальности взаимодействуют между собой.

Предложенный набор методов объяснимости и результаты анализа позволяют глубже понять внутренние механизмы мультимодальных моделей и могут служить основой для разработки более прозрачных и ответственных систем.

В результате работы были выявлены характерные особенности поведения модели при работе с различными типами визуально-текстовых запросов, включая случаи рассогласования между визуальными и текстовыми признаками.

Литература

1. **CLIP: Connecting Text and Images** [Электронный ресурс] // OpenAI. — URL: <https://openai.com/index/clip/> (дата обращения: 25.10.2025).
2. **Li X. et al.** M4: A Unified XAI Benchmark for Faithfulness Evaluation of Feature Attribution Methods across Metrics, Modalities, and Models. — 2023.
3. **Bhalla U. et al.** Interpreting clip with sparse linear concept embeddings (splice) //Advances in Neural Information Processing Systems. — 2024. — Т. 37. — С. 84298–84328.

Д.Д. Митюнин, студ.; рук. Д.Э. Борцова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ РОБОТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Интеграция систем машинного зрения в RPA-платформы создает повышенную нагрузку на вычислительную инфраструктуру предприятий, особенно в распределенных бизнес-процессах с географически разнесенными источниками данных. Обработка потоковых видеоданных в реальном времени требует специализированного подхода к проектированию вычислительных систем, обеспечивающего минимальные задержки, отказоустойчивость и масштабируемость.

Для решения этих задач предлагается трехуровневая архитектура вычислительного комплекса, основанная на принципах системотехники. На периферийном уровне используются микропроцессорные системы на базе ARM и x86 архитектур, выполняющие предварительную обработку видеопотоков и фильтрацию данных в непосредственной близости от источника. Это позволяет значительно снизить объем передаваемой информации и уменьшить нагрузку на сетевую инфраструктуру.

Сетевой уровень организован как сегментированная LAN-сеть с применением механизмов QoS для приоритизации трафика машинного зрения и технологий SDN для гибкого управления потоками данных между edge-устройствами и серверным кластером. На серверном уровне развертывается кластер на базе GPU-ускорителей для выполнения ресурсоемких нейросетевых моделей компьютерного зрения, с оркестрацией на основе Kubernetes и интеграцией с RPA-платформами, такими как PIX RPA.

Реализация такой архитектуры демонстрирует эффективное распределение вычислительной нагрузки, минимизацию задержек передачи данных и обеспечивает горизонтальное масштабирование системы, что соответствует современным тенденциям развития вычислительных систем и сетей и способствует развитию отечественных IT-решений в области промышленной автоматизации.

Литература

1. Таненбаум Э., С. Остин — **Архитектура компьютера**. — СПб.: Питер, ISBN — 978-5-4461-1103-9, 978-5-496-00337-7, год публикации — 2025.
2. **Официальный сайт компании «PIX Robotics» [Электронный ресурс]**. URL: <https://pix.ru/> (дата обращения: 30.11.2025).

*И.В. Довгошапко, студ.;
рук. В.Л. Широков, к.т.н., ст.пр. (НИУ «МЭИ»)*

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО САМОСВАЛА В ЛАБОРАТОРИИ В ЦЕЛЯХ ПРОВЕРКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К РЕАЛЬНЫМ

Бортовое оборудование роботизированного самосвала [1–2] имеет сложную программно-аппаратную реализацию. Тестирование отдельных бортовых узлов непосредственно на самосвале практически нереально. Комплексная же проверка в реальных условиях тем более невозможна.

Поэтому предложена эмуляция внешних воздействий на бортовые узлы самосвала с использованием программно-аппаратной имитации управляющих воздействий, приближенных к реальным, непосредственно в лаборатории.

В результате выполняется тестирование как отдельных узлов, так и может комплексно, то есть всего бортового оборудования как системы.

Для этого разработаны программы тестирования и используются блоки сопряжения с узлами бортового оборудования, обеспечивающие как ввод управляющих воздействий, так и визуализацию их влияния на поведение исполнительных органов самосвала. Это позволило проверить все узлы бортового оборудования и перейти к комплексным тестовым испытаниям роботизированного самосвала в реальных условиях.

Так же проверяется как штатная работа отдельных узлов бортового оборудования, так и в нештатных ситуациях, причём всей системы в целом.

В перспективе возможно создание полного цифрового двойника роботизированного самосвала. И это может стать как темой магистерской диссертации, так и направлением дальнейшей разработки.

Литература

1. Довгошапко И.В., Широков В.Л. Разработка системы сбора, обработки и логгирования данных роботизированных горнотранспортных самосвалов // Тр. МНТК-2024.
2. Довгошапко И.В., Широков В.Л. Модернизация системы сбора и обработки данных роботизированных горнотранспортных самосвалов // Тр. МНТК-2025.

*Д.Г. Данилин, ассистент;
рук. Ш.А. Оцоков, д.т.н., проф. (НИУ МЭИ)*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ VPN

В данной работе формулируется математическая постановка задачи построения отказоустойчивой виртуальной частной сети; определяется топология отказоустойчивой частной сети, оптимальная с точки зрения минимизации занимаемой дополнительной полосы пропускания. Проведены разработка и исследование алгоритма построения отказоустойчивой VPN, а также эксперименты на заданных топологиях сетей.

На базе модернизированного в работе алгоритма Италиано-Растоги был разработан алгоритм, решающий задачу обеспечения отказоустойчивости VPN для асимметричной модели VPN и реализующий стратегию защиты звена.

Основным результатом представляется учёт особенностей асимметричной потоковой модели в задаче обеспечения отказоустойчивой модели VPN и как итог — алгоритм для построения отказоустойчивой VPN для асимметричной модели.

Таким образом, итогом исследования является разработка приближённого алгоритма расчёта отказоустойчивых VPN-сетей для древовидной потоковой модели.

На основании разработанного алгоритма была создана программная реализация.

Разработанный алгоритм построения отказоустойчивой VPN-сети применялся к следующим заданным топологиям исследуемых сетей: топология кольцо, смешанная топология, топология составное кольцо. Число конечных узлов VPN-сети варьировалось от 2 до максимального значения, возможного для каждой рассматриваемой топологии.

Литература

1. **Росляков А.В.** Виртуальные частные сети. Основы построения и применения / А.В. Росляков. — М.: Эко-Трендз, 2006. — 304 с.
2. **Татт, У.** Теория графов / У. Татт. — М.: Мир, 1998. — 424 с.

Секция 17
УПРАВЛЕНИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
Control and intelligent technologies

Председатель секции: доц., к.т.н. Мохов Андрей Сергеевич

Секретарь секции: Гребенщиков Николай Ильич

А.А. Алибеков, студ.; рук. И.С. Михайлов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Актуальность обусловлена необходимостью перехода от разрозненных алгоритмов к целостным программным системам, обеспечивающим переход от реактивного к предиктивному управлению для повышения эффективности и безопасности нефтедобывающего оборудования.

Новизна заключается в разработке универсальной модульной архитектуры, которая реализует Feature Store для управления признаками временных рядов и обеспечивает динамическую конфигурацию пайплайнов обработки данных. Архитектура позволяет комбинировать статистические методы и машинное обучение, поддерживает онлайн-обучение и гибко настраивается под различные типы оборудования без перепроектирования системы.

Личный вклад автора включает проектирование архитектуры, разработку ключевых программных модулей и протоколов их взаимодействия, реализацию механизмов обеспечения воспроизводимости экспериментов и версионирования моделей, а также создание подсистемы для обработки нестационарных промышленных данных.

Перспективы использования полученных результатов связаны с внедрением системы на облачной или edge-инфраструктуре нефтедобывающих активов для мониторинга широкого спектра критических параметров в реальном времени. Разработанная архитектура служит основой для создания элементов цифрового двойника скважинного оборудования, обеспечивая переход к проактивному управлению добычей. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию с системами автоматического управления технологическими процессами, что позволит реализовать замкнутый контур предиктивного регулирования. Кроме того, предлагаемое решение может быть адаптировано для других видов промышленного оборудования, требующих непрерывного мониторинга и прогнозной аналитики.

Литература

1. **Шлыков С.В.** Применение методов машинного обучения для автоматизации процессов в нефтегазовой отрасли // Цифровая трансформация. 2023. №4. С. 45–58. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-mashinnogo-obucheniya-dlya-avtomatizatsii-protsessov-v-neftegazovoy-otrasli/viewer>

*С.С. Саксонова, студ.;
рук. С.Ю. Папулин, к.т.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

Актуальность работы обусловлена растущим применением методов машинного обучения для анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) в диагностике неврологических заболеваний и развитии интерфейсов «мозг-компьютер» [3]. Целью исследования является сравнительный анализ современных алгоритмов машинного обучения для предсказания и прогнозирования физиологических изменений по сигналам ЭЭГ.

В работе систематизированы ключевые направления интеграции ЭЭГ и машинного обучения. Одними из наиболее изученных направлений являются предсказание и классификация эпилептических припадков, где глубокое обучение демонстрирует особую эффективность [1].

К перспективным направлениям относятся воспроизведение речи с использованием энкодер-декодер архитектур [2], оценка когнитивной нагрузки и диагностика нейродегенеративных заболеваний, например, болезни Альцгеймера [3].

Выбор конкретной модели машинного обучения и метрик оценки качества определяется спецификой задачи и требуемым балансом между точностью и интерпретируемостью результатов. Основные направления будущих исследований включают разработку гибридных моделей и усовершенствование методов выделения информативных признаков из ЭЭГ-сигналов.

Литература

1. **Mallick S., Veeky B.** Novel deep learning framework for detection of epileptic seizures using EEG signals // *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2024. Vol. 18. DOI: 10.3389/fncom.2024.1340251
2. **Makin J.G., Moses D.A., Chang E.F.** Machine translation of cortical activity to text with an encoder-decoder framework // *Nature Neuroscience*. 2020. Vol. 23. No. 4. P. 575–582. DOI: 10.1038/s41593-020-0608-8
3. **Mirchi N., Warsi N.M., Zhang F.** Decoding Intracranial EEG With Machine Learning: A Systematic Review // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022. Vol. 16. Article 913777. DOI: 10.3389/fnhum.2022.913777

*М.А. Романов, Д.С. Троянов, студенты;
рук. В.О. Толчеев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛНОГО ТЕКСТА И КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ

В области обработки и анализа текстовых данных для классификации документов используются термины, извлекаемые из документов. В нашей работе изучается целесообразность применения ключевых слов (КС) для представления текстов и проведения классификации.

Исследования проводятся применительно к научным документам, выборка сформирована из общедоступного информационного ресурса arXiv.org. Размер выборки 1 600 документов, равномерно распределённых по 4 классам (компьютерное зрение, компьютерная лингвистика, криптография и безопасность, компьютеры и общество). Предварительная обработка текстовых данных включает токенизацию, нормализацию регистра, лемматизацию, удаление стоп-слов и спецсимволов; для векторизации применяются TF-IDF и sentence-transformer-эмбединги.

Для извлечения ключевых слов используются методы на основе обучения без учителя: TF-IDF — классический метод взвешивания терминов, адаптированный для этой задачи, — а также RAKE, YAKE, TextRank, PositionRank, SingleRank, KeyBERT и EmbedRank. Качество извлечения КС определяется на выборках Inspec, SemEval и Krapivin. Наилучшие результаты показали RAKE (Inspec, $K=10$: $F1@K=0.418$), TF-IDF (SemEval, $K=5$: $F1@K=0.346$) и EmbedRank (Krapivin, $K=20$: $F1@K=0.309$), где K — количество ключевых слов.

В качестве методов классификации используются линейный SVM, логистическая регрессия и BERT-классификатор. Наилучшее качество классификации по всему тексту показал BERT (Accuracy=0.813, $F1=0.810$). Самые высокие показатели достигаются при связке RAKE ($K=20$) + TF-IDF: Accuracy=0.779, $F1@K=0.780$; близкие результаты дают KeyBERT ($K=10$, $F1@K=0.781$) и EmbedRank ($K=20$, $F1@K=0.723$).

Проведенные исследования показывают, что применение эмбединговых подходов для выявления КС позволяют приблизиться к показателям качества классификации по всему тексту, повышая при этом скорость анализа научных статей.

Литература

1. Rose, S., Engel, D., Cramer, N., & Cowley, Automatic keyword extraction from individual documents, 2010.
2. Grootendorst. KeyBERT: Minimal keyword extraction with BERT, 2020.

В.А. Волобуева, студ.;
рук. Д.В. Вершинин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ГАЛАКТИК НА АСТРОНОМИЧЕСКИХ СНИМКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Поток информации из космоса, получаемый благодаря современным телескопам, ставит перед астрономами сложный вызов. Ограниченность вычислительных ресурсов и временные затраты, сопряженные с интерпретацией снимков из космоса, создают существенные препятствия для их полномасштабного изучения. Выходом из этой ситуации является переход к автоматизированным системам обработки и анализа космических изображений. Однако сложность нейросетевых моделей для детекции галактик требует значительных вычислительных ресурсов, недоступных большинству исследователей на персональных компьютерах.

В ходе исследования разработано клиент-серверное приложение, которое решает проблему вычислительной сложности через распределенную архитектуру. Локальное клиентское приложение с графическим интерфейсом обеспечивает удобство загрузки и предварительной обработки снимков, в то время как удаленный сервер выполняет ресурсоемкую классификацию с использованием GPU. Для решения задачи распознавания галактик применяются современные нейросетевые архитектуры глубокого обучения, обеспечивающие высокую точность классификации морфологических типов. Такое разделение позволяет пользователям работать с системой на обычных компьютерах, получая доступ к мощности специализированного оборудования.

Разработанная система может быть внедрена в исследовательские обсерватории для ускорения обработки астрономических данных. В перспективе архитектура позволяет интегрировать дополнительные модули для решения смежных задач: оценки фотометрических параметров, обнаружения аномалий и классификации других астрономических объектов. Система демонстрирует эффективный подход к организации распределенных вычислений в научных исследованиях.

Литература

1. **Ньюмен С.** Создание микросервисов. — СПб.: Питер, 2016.
2. **Николенко С., Кадуриин А., Архангельская Е.** Глубокое обучение. — Санкт-Петербург: Питер, 2018.
3. **Кучма М.О., Воронин В.В., Блошинский В.Д.** Настройка, обучение и тестирование сверточной нейронной сети в задаче тематической обработки спутниковых изображений // Информатика и системы управления. 2021.

С.А. Чагин, студ.; рук. В.А. Шихин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО СИСТЕМЕ УЧЁТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

На основе анализа предметной области и зарубежного опыта применения систем учёта электроэнергии, обоснована необходимость модернизации автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ) для магистрального нефтепровода. Показана актуальность внедрения АИИС КУЭ на объектах нефтетранспортной инфраструктуры и определены их основные функциональные возможности с учетом требований к качеству электроэнергии, метрологическим нормам и показателям энергоэффективности. Проведён анализ особенностей энергопотребления магистрального нефтепровода на примере ООО «Транснефть — Балтика» и выявлены ключевые особенности нагрузки оборудования нефтетранспортной отрасли, а также рассмотрена многоуровневая структура действующей системы учёта [1].

Выполнен обзор и анализ нормативных документов [2], регулирующих создание и эксплуатацию АИИС КУЭ для работы на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Систематизированы общие технические требования к АИИС КУЭ, предъявляемые нормативной документацией: требования к составу и структуре, средствам измерений, программному обеспечению, надежности, технической документации и взаимодействию со смежными автоматизированными системами.

Определены цели и задачи работы по модернизации АИИС КУЭ, включающие разработку технического решения, выбор оборудования, разработку средств обеспечения надёжности с расчётом сформулированных показателей надежности, формирование программы испытаний и анализ работы системы в эксплуатационных условиях.

Литература

1. Концепция создания автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учёта электрической энергии (мощности) для предприятий ОАО «АК «Транснефть». М.: «Транснефтьсервис С», 2005.
2. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учёта электроэнергии (мощности) субъектов оптового рынка электроэнергии. Термины и определения. Приложение 11.0. Утв. НП «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии (мощности)» (НП «АТС»), 2011.

А.С. Бирюкова, студ.; рук. В.А. Шихин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДА

Проведён комплексный анализ предметной области создания безэкипажных надводных судов (БНС) малого водоизмещения [1], оснащенных системами гибридного электроснабжения, включая имеющийся зарубежный опыт. Особое внимание уделено рассмотрению эффективности практического применения гибридных систем с использованием солнечной энергии в качестве дополнительного возобновляемого источника энергии, применительно к конкретным климатическим условиям.

Выполнен обзор нормативных документов, регламентирующих состав и эксплуатацию малых надводных судов [2].

Проведён детальный анализ энергопотребления малого морского БНС, рассмотрена структура проектируемой системы гибридного электроснабжения и выявлены ключевые особенности нагрузки бортового оборудования, включая силовые установки.

На основе проведённого анализа систематизированы общие технические требования к системе управления гибридным электроснабжением, включая требования к составу и архитектуре системы, средствам измерений и бортовым средствам передачи информации, программному обеспечению, надёжности, безопасности.

Определены цели и задачи разработки технического решения по созданию БНС с гибридным энергоснабжением, включающие выбор преимущественно отечественного оборудования, расчёт показателей надёжности бесперебойного энергоснабжения и оценку долговременности автономного плавания.

Литература

1. **Охрименко С.Н.** Безэкипажные катера и корабли. Их характеристики и решаемые ими задачи / С.Н. Охрименко, И.Л. Рубанов, А.Н. Рубцов // Подводные исследования и робототехника. — 2025. — № 2 (52). — С. 81–87.
2. **ГОСТ Р 59284–2020** Суда безэкипажные технического флота. Общие требования. — Введ. 2021-04-01. — М. : Стандартиформ, 2021. — 11 с.

*Д.Ю. Низамов, студ.; рук. С.А. Зайцев, к.т.н., доцент
(ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», Москва)*

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСОВ ТОКА В ПОВЕРХНОСТНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В работе исследовался барьерный разряд, полученный на макетной системе, состоящей из двух медных фольговых электродов, разделенных керамической пластиной. Ток в системе содержит группы импульсов, соответствующих микро-разрядам, которые составляют барьерный разряд.

Для некоторых областей применения, в частности, в биологии, требуется анализ отдельных микро-разрядов [1]. Для этого необходимы методы детектирования и анализа соответствующих им импульсов тока.

Для детектирования импульсов обучена модель машинного обучения, представляющая собой ансамбль из шести рекуррентных нейронных сетей. Модель протестирована на наборе из 1 млн. измерений тока, содержащем 295 импульсов. Модель корректно определила 90.51% импульсов, при этом количество ложных срабатываний составило 27 шт.

С помощью модели был проведен анализ 200 млн. измерений тока. Оценивались средняя амплитуда импульсов $\bar{I}_m$, средний перенесенный кажущийся заряд $\bar{Q}$ и его межквартильный размах IQR_Q . Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики импульсов тока

Тип импульсов	Количество, шт.	$\bar{I}_m$, А	$\bar{Q}$, пКл	IQR_Q , пКл
Положительные	24842	0.00393	27.83	30.95
Отрицательные	28628	-0.00131	-11.99	4.36

Дисбаланс перенесенного кажущегося заряда оценивался по формуле (1) и составил $D = 33.82\%$.

$$D = 100\% \cdot (Q_+ + Q_-) / (|Q_+| + |Q_-|), \quad (1)$$

где Q_+ — суммарный кажущийся заряд, перенесенный положительными импульсами, Q_- — отрицательными.

Таким образом, положительные импульсы в среднем имеют более высокое значение амплитуды и переносят больший кажущийся заряд, чем отрицательные импульсы. Большинство пропущенных моделью импульсов — отрицательные, с этим связан дисбаланс перенесенного кажущегося заряда.

Литература

1. **Karl H. Schoenbach et al.** A Scaling Law for Bioelectric Effects of Nanosecond Pulses. Bioelectric Notes, Note 2, Jun. 12 2008.

Ю.М. Агеева, студ.; рук. В.Л. Елисеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОМЕТРИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ

Быстродействующее управляемое зеркало (Fast Steering Mirror) — устройство, предназначенное для точного управления лазерным лучом. Области применения подобных устройств — томография, фотолинтография, астрономия, телекоммуникации и некоторые другие, где необходимы стабилизация и точное позиционирование луча [2].

Управление быстродействующим зеркалом (FSM) представляет собой сложную задачу, поскольку этот объект является многосвязной системой (MIMO — Multiple Input Multiple Output) с ярко выраженными перекрёстными связями, нелинейным гистерезисом и динамическими эффектами. Игнорирование перечисленных характеристик устройства может привести к ошибкам позиционирования при высокоскоростном трекинге сложных траекторий. Рассматриваемое зеркало имеет две оси управления (X и Y), что делает его по своей природе двумерным объектом. Однако из-за механической целостности конструкции и погрешностей производства управляющее воздействие, приложенное к одной оси, вызывает нежелательный отклик по другой. Это явление называется механической перекрестной связью. Входное напряжение U_x влияет не только на угол θ_x , но и через передаточную функцию на угол θ_y , в свою очередь U_y влияет на θ_x . Одним из вариантов устранения данной проблемы является синтез регулятора, учитывающего перекрёстные связи.

В ходе работы было выполнено моделирование в программе SimInTech, а также реализована схема управления с ПИД-регулятором. Для увеличения точности управления был синтезирован нейросетевой квазиоптимальный для управления MIMO-объектом. Для этого математическая модель была переведена из непрерывного времени в дискретное и проведено моделирование и синтез элементов нейросетевой системы управления в пакете NNACS [2]. Данный подход позволил увеличить точность управления существенно нелинейным объектом и компенсировать негативные эффекты от влияния каналов управления друг на друга.

Литература

1. Yang S., Li X. First Principles based High-precision Modelling and Identification of Piezoelectric Fast Steering Mirror // arXiv preprint arXiv:2412.08332. 2024
2. Елисеев В.Л. Пакет NNACS для решения учебных и исследовательских задач нейросетевого управления // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании», Екатеринбург, 10–13 марта 2015, С. 561–566.

И.Н. Дашин, студ.; рук. М.М. Полотнов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ С ПЕРЕСЕКАЮЩИМСЯ ФУНКЦИОНАЛОМ ДЛЯ АДМИНИСТРИРОВАНИЯ СЕРВИСА ТАКСИ

Необходимо разработать систему веб-приложений для администрирования сервиса такси с различными группами пользователей и пересекающейся функциональностью. Предметом исследования являются архитектурные решения для организации кодовой базы таких приложений. Рост сложности пользовательских интерфейсов и масштабирование команд разработки вызывают проблемы с организацией общих модулей между приложениями.

Практическая задача представляет собой разработку системы администрирования сервиса такси, которая потребовала создания связанных приложений: административной панели и партнерского кабинета. Компоненты интерфейса пересекаются, но при этом работают с разными данными и правами. Требуется обеспечить независимые циклы обновления для внутренней и партнерской функциональности.

В работе проанализированы основные архитектурные подходы к масштабированию: классическая архитектура, модульная организация, слоистая архитектура, монорепозитарий и микрофронтенды. Для каждого подхода определены критерии применимости: размер команды, степень связанности модулей, возможность независимого развития частей системы, требования к инфраструктуре. Сформулирована методология выбора архитектурного решения на основе анализа четырех факторов: масштаба пересечения функциональности между приложениями, требований к независимости циклов разработки, размера команды и доступности экспертизы для поддержки инфраструктуры.

Литература

1. **Хавербеке М.** Выразительный JavaScript. Современное веб-программирование.
2. **Martin R.C.** Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design.
3. **Osmani A.** Learning JavaScript Design Patterns.

Ш. Дей, асп.; рук. Д.В. Шилин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ ОЦЕНКИ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ПРИ 3D-СКАНИРОВАНИИ

Процесс совмещения разрозненных облаков точек является критически важным этапом в 3D-сканировании [1]. Существует множество методов определения опорных точек для последующего соединения снимков (например, автоматическое распознавание объектов, методы геометрической корреляции), но для их объективного количественного сравнения необходим стандартизированный и воспроизводимый набор данных. Актуальность исследования обусловлена потребностью в инструменте, позволяющем генерировать такие наборы данных с контролируемыми параметрами. Целью данной работы является разработка программного комплекса, способного формировать наборы данных для исследования статико-динамических показателей процесса 3D-сканирования и оценки таких метрик методов определения опорных точек, как время обработки данных, погрешности в точности и параметры плавности движения системы [1]. В рамках работы был создан программный код, который позволяет размещать облако точек, снятое на точный 3D-сканер Scanform L5, в ортогональную систему координат таким образом, что горизонтальная плоскость объекта строго совпадает с одной из базовых плоскостей системы. Далее программное обеспечение позволяет симулировать процесс съемки, размещая в виртуальном пространстве камеру с заданными характеристиками и отсекая невидимые для неё точки (моделирование окклюзии). Сформированный набор данных содержит точные координаты размещения виртуальной камеры, углы её наклона и соответствующие им облака видимых точек. Этот набор данных служит эталонной основой для количественной оценки и сравнения различных методов определения опорных точек, позволяя установить зависимости показателей качества (точность, скорость) от выбранного метода [2].

Литература

1. **Pomerleau F. et al.** A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics // Foundations and Trends® in Robotics. — 2015. — Т. 4. — №. 1. — С. 1–104.
2. **Gu X., Wang X., Guo Y.** A review of research on point cloud registration methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Т. 782. — №. 2. — С. 022070.

В.В. Артюшина, студ.; рук. А.С. Мохов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ С ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ

В современных инженерных и промышленных компаниях объем технической документации достигает критических масштабов. Эффективный поиск, анализ и синтез информации из разнородных документов (PDF, DOCX, стандарты, спецификации) является трудоемкой задачей, требующей привлечения высококвалифицированных специалистов. Автоматизация этих процессов с помощью систем искусственного интеллекта представляется перспективным направлением для повышения эффективности и снижения операционных издержек.

Цель работы — разработать прототип интеллектуального ассистента, способного выполнять комплексные задачи по работе с технической документацией путем кооперации специализированных программных агентов.

В основе разработки лежит концепция мультиагентных систем (Multi-Agent Systems) на основе больших языковых моделей (LLM), где несколько интеллектуальных агентов, наделенных различными ролями и инструментами, способны совместно решать поставленную задачу, обмениваясь сообщениями.

Прототип системы включает следующих базовых агентов: Агент-координатор (анализ первоначального запроса пользователя; декомпозиция общей задачи на подзадачи; определение, каких агентов и в какой последовательности задействовать), Агент-аналитик (глубокий анализ технического содержания); Агент-редактор (формирование финальных ответов для пользователя).

Агенты наделены специфическими инструментами (tools), позволяющими взаимодействовать со внешним миром, например — поиск информации в Интернете, доступ к файловой системе, и другими.

Задачи, с которыми способна справляться система — это общая систематизация информации, поиск причин неисправностей и возможные способы их устранения, консультирование по функционалу и командам.

Подобный ассистент может быть полезен как сотрудникам службы поддержки, так и конечным пользователям продуктов.

Литература

1. **Что такое мультиагентные системы (2025).** URL: <https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/what-are-multi-agent-systems> (2025, 20 Ноября)
2. **Максим Ведерников (2024).** AI-агенты на основе LLM и мультиагентные системы. URL: <https://blogs.epsilonmetrics.ru/ii-agenty-i-multiagentnyye-sistemy/> (2025, 20 Ноября)

К.Р. Хохлов, студ.; рук. А.С. Мохов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАБОТЫ RAG-СИСТЕМ

RAG-система (Retrieval-Augmented Generation) — это архитектура, которая сочетает в себе извлечение релевантной информации из внешних источников знаний, хранящихся в базе знаний (БЗ) с генерацией ответов на естественном языке при помощи большой языковой модели (LLM). Архитектура RAG реализует следующий принцип обработки запросов: система принимает входной вопрос, выполняет семантический поиск релевантных документов в БЗ и затем направляет отобранные материалы вместе с исходным запросом в большую языковую модель. Задача LLM заключается в генерации точного ответа, соответствующего предоставленным в виде контекста источникам.

Качество генерации ответов такой системой сильно зависит от качества нахождения релевантных документов в БЗ, поскольку, при ненахождении нужной информации, LLM не будет отвечать на заданный вопрос. Таким образом, рассматриваемая проблема является актуальной.

В статье исследуются и сравниваются различные способы модификации этапов алгоритма RAG для повышения итогового качества ответов. К таким этапам относятся: способы разбиения (чанкинга), способы векторизации исходных документов, способы поиска релевантных документов, промпт-инжиниринг большой языковой модели и другие.

Как показывают исследования, одним из наиболее действенных способов повышения качества RAG-систем является именно настройка чанкинга. Он необходим по причине того, что документы в БЗ могут быть довольно объемными, а LLM способна на вход принимать текст лишь ограниченной длины. Базовый подход — разбиение по фиксированному количеству символов, более продвинутые — разбиение с перекрытием и семантическое разбиение (разбиение на осмысленные фрагменты текста).

Проведенное исследование позволило выявить достоинства и недостатки различных подходов к настройке и улучшению качества выдачи ответов RAG-системой.

Литература

1. **Прокачиваем RAG (2025).** URL: <https://habr.com/ru/articles/946888/> (2025, 27 октября)
2. **Стратегии настройки RAG-приложений (2025).** URL: <https://nuancesprog.ru/p/20033/?ysclid=mh2a1viisw209237730> (2025, 3 ноября)

С.К. Князев, студ.; рук. В.Л. Елисеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ БАНКОВСКОГО ФРОДА

В современном мире растёт число мошеннических банковских операций со счетами частных лиц — так называемого фрода. Большой объём обрабатываемых транзакций делает ручное выявление фрода практически невозможным. Это делает актуальной задачу разработки алгоритмов обнаружения фрода. В частности, большое развитие получили методы машинного обучения, в том числе, с применением искусственных нейронных сетей. Однако даже при использовании современных моделей остаётся открытым вопрос, насколько надёжно они работают в «боевых» условиях и способны ли они обнаруживать ранее не встречавшиеся схемы мошенничества, а не только воспроизводить закономерности обучающей выборки.

При построении систем обнаружения фрода с помощью машинного обучения возникает ряд характерных проблем: дефицит размеченных данных для обучения модели, сильный дисбаланс классов, постоянное изменение мошеннических схем. В таких условиях привычные метрики (Accuracy, ROC-AUC и т.д.) дают слишком оптимистичную картину работы модели и зависят от конкретной тестовой выборки. В данной работе исследуется применение критериев устойчивости EDCA (Excess, Deficit, Coating, Approx), в которых анализируется соответствие фактической области принятия решений модели и целевой области принятия решений, заданной обучающими данными [1]. Это предоставляет возможность более точно сравнивать модели, применяемые для обнаружения фрода, не только в пределах размеченной выборки, но и за её пределами.

В работе рассмотрены несколько различных моделей обнаружения фрода. Проводится их сравнение с помощью классических метрик качества на основе матрицы ошибок и с помощью критериев EDCA. Демонстрируется уязвимость моделей машинного обучения к состязательным атакам и предлагаются подходы по снижению риска таких атак. Также проводится анализ применения критериев EDCA для данных, используемых при обучении моделей [2].

Литература

1. **Гурина А.О., Елисеев В.Л.** Эмпирический критерий качества одноклассового классификатора // ИСТ-2021, с. 673–682.
2. **Маврина А.А., Никитина Н.К., Елисеев В.Л.** Обзор и анализ методов оценки качества и сравнения нейросетевых классификаторов (EDCA/EDCAP) // ПАУТС-2023 труды конф. 2023.

*А.И. Мартынов, студ.; П.Н. Мелешко, студ.; А.Д. Разорвин, студ.;
рук. О.В. Глухов, ассистент (НИУ «МЭИ», Москва)*

АДАПТИВНАЯ БИНАРИЗАЦИЯ ПОСРЕДСТВОМ СВЁРТОЧНЫХ СЛОЁВ И КЛАССИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ РЕГИОНОВ, НАЙДЕННЫХ КАК КОНТУРЫ: МОДУЛЬНЫЙ КОНВЕЙЕР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

В работе рассматривается подход к ускорению алгоритмов детектирования объектов на видеопотоке при использовании вычислительных платформ с низкой производительностью и ограниченным энергопотреблением. Целью исследования является увеличение числа обрабатываемых кадров в секунду при минимальной потере точности.

На начальном этапе вместо применения стандартных детекторов на нейронных сетях была использована схема, основанная на адаптивной бинаризации, выделении контуров и передаче найденных областей на полносвязные слои классификатора. Такой подход позволил упростить задачу для слоёв классификатора, однако выявил ограничение по скорости работы классических методов бинаризации на ресурсно-ограниченных устройствах и значительное снижение точности на сложном фоне.

В ходе анализа был предложен альтернативный метод: обучение небольшой последовательности свёрточных слоев, генерирующих маски, аналогичные результатам адаптивной бинаризации. Экспериментально показано, что такая замена позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку и увеличить быстродействие системы при сопоставимом качестве выделения объектов.

Дополнительно рассматривается обобщение предложенного метода: использование свёрточных слоев не только для имитации бинаризации, но и для выделения объектов по иным визуальным признакам, что делает модуль генерации карт признаков универсальным и заменяемым на другие, способные работать, выделяя объекты интереса по иным признакам.

Литература

1. **Zhu Q. и др.** Hierarchical Convolutional Neural Network with Feature Preservation and Autotuned Thresholding for Crack Detection // IEEE Access. 2021. Т. 9. С. 60201–60214.
2. **Duong-Trung N., Ha D.N.L., Huynh H.X.** Classification-Segmentation Pipeline for MRI via Transfer Learning and Residual Networks., 2022. С. 39–43.

И.В. Шубин, асп.; рук. Д.В. Шилин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИНТЕЗ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫБОРКИ НИЗКОГО КАЧЕСТВА

На момент сентября 2025 года по информации arXiv.org из более чем 100 тыс. статей, исследующих обработку изображений, ~93 тыс. посвящены использованию искусственных нейронных сетей (ИНС). Эффективность данных методов может быть ограничена низким качеством обучающей выборки [1]. Исследователями отмечается ограниченная эффективность методов на основе ИНС работать с нечёткими категориями [2].

В данной работе на примере задачи контроля качества пищевой продукции проводится синтез такого технического решения, которое позволило бы достигнуть точности принятия решений 0.9. Постановка задачи включает в себя сегментацию объектов 4 классов, 2 из которых являются фоном, а 2 других — целевыми объектами.

Процедура обучения модели YOLOv11-seg-n проводилась на 100 изображениях, 21 из которых имело низкое значение дисперсии лапласиана, а 30 изображений имели угол наклона съёмки 20–30°. Среднее значение метрик качества для случая наилучшей итерации и эпохи обучения составили: Precision = 0.790; Recall = 0.471;

На основе данной модели был разработан программный комплекс, первая программа в котором позволяла пользователю настраивать значения границ разделения объектов на 4 категории. Вторая программа принимала на вход набор изображений, видео в формате .mp4 или видео сигнал в формате AVI. Анализируя периметр сегментированных областей, после чего решается задача минимизации СКО точек эллипса, описывающего все объекты фоновых классов по формуле:

$$Q(x, y) = \min ||Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F|| \quad (1)$$

Далее для каждой из областей целевого класса рассчитывается отношение площади за пределами эллипса и внутри него, затем отношение сравнивается с одним из граничных значений, рассчитанных на основе аннотаций пользователя. В результате согласованность решений модели с оператором составила 0.885, приблизившись к целевой точности, но не достигнув её.

Литература

1. **Varoquaux G, Cheplygina V.** Machine learning for medical imaging: methodological failures and recommendations for the future. *NPJ Digit Med.* 2022.
2. **Lars & Koch, Reinhard.** (2021). Life is not black and white — Combining Semi-Supervised Learning with fuzzy labels.

*В.В. Рыкунов, ассистент;
рук. Д.В. Шилин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СИНТЕЗ НЕЧЁТКОЙ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «МАССА–ПРУЖИНА–ДЕМПФЕР»

С каждым годом растет интерес к нечётким моделям и эволюционным методам для управления нелинейными динамическими системами (данные eLIBRARY.ru и Scopus). Ключевой тестовый объект — система «масса–пружина–демпфер» (MSD).

В работе предложен гибридный подход: нечёткая модель Такаги–Сугено (TSK) для MSD с онлайн-оптимизацией параметров (коэффициентов аффинных konsekventов и функций принадлежности) генетическим алгоритмом. Цель — высокая точность и устойчивость при изменении параметров.

Данные сгенерированы в MATLAB/Simulink: траектории при варьировании m , c , k , с шумом и искажением шага интеграции (имитация ошибок). Входные переменные — перемещение x и скорость $\dot{x}$ — гранулированы методом Fuzzy C-Means (FCM) с 2–6 правилами.

Оптимизация функций принадлежности выполнена дифференциальной эволюцией (DE/rand/1/bin): популяция из 25 индивидов, 30 поколений за цикл. Новые кандидаты формировались на основе случайного базового вектора и разностного вектора двух членов популяции, с бинарным кроссовером.

Для аффинных konsekventов TSK реализована онлайн-адаптация коэффициентов a_i , b_i , c_i методом рекурсивного наименьших квадратов (RLS) при ухудшении качества предсказания или изменении параметров.

Разработан программный комплекс с автоматической грануляцией, визуализацией функций принадлежности, онлайн-оптимизацией и мониторингом ошибок.

Вывод: комбинированный подход (TSK + эволюционная оптимизация) обеспечивает точность, адаптивность, устойчивость к шуму и нелинейности, сохраняя компактность и интерпретируемость.

Литература

1. **Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С.** Нечёткие модели и сети. — 2-е изд. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2018. — 284 с. ISBN 978-5-9912-0283-1.
2. **Divya B., Ganesan K.** Applications of Fuzzy Differential Equations on Vibrating Spring Mass System. International Journal of Analysis and Applications, 2020.

В.В. Кулешов, студ.; рук. Д.В. Вершинин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

О НОВОМ ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ ИЗМЕНЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В данном докладе предлагается применение метода определения граничных значений параметров характеристического полинома по частотным характеристикам (Соборного метода) для анализа изменения устойчивости линейных нестационарных систем. Данный метод позволяет строить специальную функцию-границу для любого анализируемого коэффициента, зависящую как от частоты, так и от всех остальных коэффициентов линейной системы. Большим плюсом в данном случае является именно дифференцируемая зависимость функции-границы от коэффициентов. Благодаря данному свойству, при анализе изменения устойчивости линейных нестационарных систем представляется возможным закладывать изменение коэффициентов во времени в функцию-границу. Таким образом, образуется трёхмерное пространство, в которой ось z отражает значения функции-границы, ось x — частоты, ось y — времени.

Таким образом, представляется возможным (при заданной динамике коэффициентов) анализировать близость и изменение близости системы к границам устойчивости. Полезным свойством подхода является возможность определения (например, через частные производные) интенсивности влияния коэффициентов на динамику движения системы относительно границ устойчивости. Если рассматривать требуемые коэффициенты управляемой системы как компоненты управляющего сигнала, появляется возможность управления системой с учётом её динамики относительно границ устойчивости.

Отсюда образуются следующие направления развития данного подхода. Во-первых, таким образом, представляется возможным перейти к задаче оптимального управления с целью, например, наиболее долгого сохранения устойчивости. Во-вторых, появляются возможности увеличения робастности систем относительно динамики их параметров.

Таким образом, применение Соборного метода к анализу изменения устойчивости с учётом изменения во времени параметров анализируемой системы открывает большие перспективы к анализу и управлению системами с точки зрения повышения их устойчивости и робастности к изменению параметров.

Литература

1. **А.В. Михайлов.** Метод гармонического анализа в теории регулирования // Автоматика и телемеханика. 1938. № 3. С. 27–81.
2. **Б.К. Чемоданов.** Математические основы теории автоматического регулирования // Высшая школа. 1971.

А.А. Глинский, асп.;
рук. М.Ю. Косинский, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА ОШИБОК В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Разработка безопасного программного обеспечения (ПО) требует своевременного выявления ошибок в создаваемом продукте [1]. Прогнозирование числа ошибок должно предоставить инженерам первичную оценку продукта перед запуском тестирования.

Частым источником ошибок являются вносимые в программный код изменения. Они также влияют на параметры продукта, которые возможно количественно оценить при помощи метрик ПО. Так, например, метрика LoC (Lines of Code) оценивает физический размер продукта, а подсчёт линейно независимых маршрутов в коде оценивает сложность программы.

Логично предположение, что метрики коррелируют с числом ошибок, — в коде большего объёма и большей сложности выше вероятность возникновения ошибки. Тогда можно поставить задачу прогнозирования числа ошибок в ПО как задачу корреляционно-регрессионного анализа, целью которого будет определение наиболее информативных метрик, имеющих сильную связь с числом ошибок, и построение математической модели способной прогнозировать число ошибок на основе этих метрик.

В качестве моделей прогнозирования хорошо себя зарекомендовали методы машинного обучения, например, линейная и полиномиальная регрессия, деревья принятия решений и нейронные сети [2]. Эти модели обучаются на выборке, содержащей признаки и соответствующие им целевые значения, после чего при поступлении новых признаков прогнозируют целевое значение. В решаемой задаче признаками являются метрики ПО, а целевым значением — число ошибок.

Исследование рассматривает проект ПО с открытым исходным кодом и историей ошибок. Формируется обучающая выборка, содержащая данные о прошлых версиях проекта. После обучения модели прогнозируют число ошибок в новой версии ПО. Для оценки качества моделей сопоставляются спрогнозированные и истинные целевые значения.

Литература

1. **ГОСТ Р 56939–2024.** Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. — Взамен ГОСТ Р 56939–2016; введ. 20-12-2024. — М.: Российский институт стандартизации, 2024. — 36 с.
2. **Жерон Орельен.** Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. Пер. с англ. — СПб.: ООО «Альфа-книга»: 2018 — 688 с.

Н.А. Назаров, асп.; рук. В.О. Толчеев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ В НАУЧНЫХ ДОКУМЕНТАХ

Эффективное извлечение ключевых слов (КС) является одной из центральных задач анализа научных публикаций. От качества определения КС напрямую зависят результаты тематического моделирования, кластеризации документов и функционирование рекомендательных систем. Современные методы позволяют учитывать контекстное и семантическое значение терминов, что повышает точность извлечения КС по сравнению с классическими статистическими подходами [1].

В данной работе рассмотрены методы: PromptRank [2], использующий генеративную модель T5, и MDERank [3], применяющий BERT для оценки релевантности. Кроме того, в исследование включены большие языковые модели — Llama 2/3 и GPT-3.5-turbo, адаптированные для задачи автоматического выделения КС посредством шаблонов (prompting).

Эксперименты выполнены на общеизвестных наборах данных Inspec и SemEval, содержащих эталонные КС для научных библиографических документов (название, аннотация). Для оценки качества используется мера F1@K (K — количество извлекаемых КС). По результатам экспериментального сравнения модели PromptRank и GPT-3.5-turbo продемонстрировали схожие показатели качества (F1@10 ≈ 0.38), превосходя MDERank (F1@10 ≈ 0.34) и немного опережая Llama 2 (F1@10 ≈ 0.36). Однако, Llama 3 превзошла по качеству все рассматриваемые модели (F1@10 ≈ 0.42). Полученные результаты указывают на потенциал больших языковых моделей при работе с текстами. Использование prompt-ориентированных методов позволяет гибко управлять процессом выделения КС, повышая адаптивность модели.

Литература

1. **Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K.** BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In: Proc. of NAACL-HLT, 2019.
2. **Ye J., Chen X., Lin C.-Y.** PromptRank: Unsupervised Keyphrase Extraction with Large Language Models. In: Proc. of EMNLP, 2023.
3. **Zhang Y., Chen W., Wang W., Zhao W.** MDERank: A Masked Document Embedding Ranking Approach for Keyphrase Extraction. Information Processing & Management, 2022.

А.А. Болотникова, студ.;
рук. Н.И. Гребенщиков, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАСТИТА У КОРОВ

Мастит — распространенное заболевание коров, вызывающее изменение свойств молока: повышение температуры и увеличение электропроводности из-за роста концентрации солей. Это одна из основных причин снижения удоев и роста затрат на лечение. Ранняя диагностика позволяет улучшить состояние животных и сократить экономические потери.

Цель работы — создание простого и дешёвого датчика для раннего выявления признаков мастита. В основе прототипа — плата Arduino Uno и датчик TDS Meter V1.0, измеряющий содержание растворенных веществ с температурной компенсацией.

Тестирование проводилось на солевых растворах (0–2 г/л), имитирующих электропроводность нормального и больного молока, в диапазоне 20–40°C. Датчик показал линейные и воспроизводимые результаты, фиксируя даже небольшие изменения концентрации соли.

Такой подход особенно важен для небольших ферм, где лабораторная диагностика недоступна.

В состав установки входят следующие компоненты:

1. Arduino Uno — микроконтроллер системы;
2. Макетная плата (breadboard);
3. Датчик TDS (Total Dissolved Solids) — измеряет электропроводность и температуру молока для оценки концентрации растворённых солей;
4. Соединительные провода;
5. Компьютер — для вывода результатов эксперимента.

На рисунке 1 представлена схема подключения компонентов экспериментальной установки.

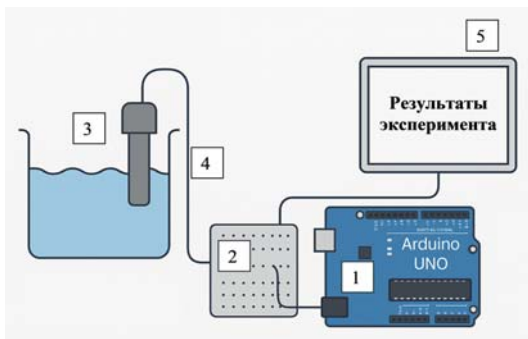


Рис. 1. Схема подключения компонентов

Литература

1. Носков А.А. Мастит у коров: причины, симптомы, профилактика и лечение // Ветеринарный журнал. — 2022. — № 4. — С. 33–36.

И.О. Косилов, асп.; рук. А.О. Щирий, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ОДНОАГЕНТНОЙ И МНОГОАГЕНТНОЙ ОРКЕСТРАЦИИ БЯМ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

В работе рассматривается применение больших языковых моделей (БЯМ) для автоматизированного анализа радиофизических данных с инструментальными вызовами. В качестве тестового набора использованы открытые карты полного электронного содержания (ТЕС) [1], представляющие собой регулярные сеточные данные с временной и географической привязкой. Такой формат позволяет формализовать задачи анализа ионосферы как последовательность вычислительных шагов и оценивать архитектуры оркестрации БЯМ по строгим метрикам [2].

В экспериментах рассматривались многошаговые сценарии: определение интервалов повышенного ТЕС, сравнение значений по сезонам и регионам, поиск устойчивых временных зон без резких колебаний и построение итогового отчёта. Одноагентная система представляла собой единую БЯМ с прямым доступом ко всем инструментам. Многоагентная архитектура включала иерархический оркестратор и специализированных агентов: агента обработки ТЕС, агента статистического анализа и агента отчётов. Разделение ролей соответствует современным паттернам построения БЯМ-систем для устойчивого выполнения сложных аналитических задач [3].

Оценка качества проводилась по формальным метрикам: корректность обработки данных и запросов, ошибка агрегированных значений относительно эталонных вычислений по исходным данным, число вызовов инструментов, доля невалидных обращений, глубина цепочки рассуждений и стабильность результатов при повторных запусках.

Эксперимент показал преимущество многоагентной оркестрации: снижение числа ошибочных обращений, уменьшение отклонения агрегированных характеристик ТЕС от эталонных значений и более стабильное поведение при повторных запусках. Предложенный подход может быть распространён на анализ других радиофизических данных.

Литература

1. **Total Electron Content (TEC) maps.** ESA GNSS Science Support Centre. URL: <ftp://gssc.esa.int/gnss/products/ionex/>
2. **W. Li, X. G. Xu, H. Yuan,** et al. Assessing Global Ionosphere TEC Maps with Satellite-Based Observations. Remote Sensing, 2019. Vol. 11.
3. **Park J., O'Brien J., Cai C., Morris M.R., Liang P., Newman M.W., Zhu J.** Generative Agents: Interactive Simulacra of Human Behavior // Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST). 2023. P. 1–22.

А. Риша, аспирант; рук. М.Ю. Косинский, доц., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и расширение задач, связанных с мониторингом, доставкой и поисково-спасательными операциями, усиливают потребность в эффективной координации групп БПЛА. Сложность таких миссий определяется динамичностью среды, ограничением времени автономной работы, наличием препятствий и необходимостью быстрого обследования обширных территорий.

В ходе исследований проанализированы существующие алгоритмы оптимизации, включая муравьиный алгоритм (ACO), метод роя частиц (PSO), генетический алгоритм (GA), алгоритм Дейкстры, с точки зрения их применения в задачах построения оптимальных маршрутов роя БПЛА. Рассмотрены их функциональные возможности, ограничения и возможные проблемы сходимости, особенно в условиях сложной среды, характерной для лесных поисково-спасательных операций [1].

Проведённое моделирование в среде Matlab показало, что традиционные методы (ACO, PSO, Дейкстры) могут обеспечивать построение маршрутов, однако часто демонстрируют медленную сходимость, высокую чувствительность к параметрам и риск попадания в локальные оптимумы. При увеличении числа узлов поиска и количества БПЛА наблюдается снижение эффективности и рост вычислительных затрат.

Для устранения указанных недостатков предложено рассмотреть гибридные алгоритмы. В частности, исследована комбинация муравьиного и генетического алгоритма с целью сокращения числа итераций, ускорения сходимости и повышения качества поиска при ограниченном времени полёта. Полученные результаты показывают, что использование данного подхода обеспечит более равномерное распределение задач между БПЛА и сократит суммарное время обследования лесных зон [2].

Литература

1. **Li P., Wei L., Wu D.** An intelligently enhanced Ant Colony Optimization algorithm for global path planning of mobile robots // *Sensors*. — 2025. — Т. 25. — № 5. — С. 1326.
2. **Aydın İ. и др.** An innovative approach for mission sharing and route planning of swarm unmanned aerial vehicles in disaster management // *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. — 2024. — Т. 13. — № 3. — С. 808–821.

*А.А. Бойков, Е.В. Виноградов, Е.А. Маликов, аспиранты;
рук. Ю.А. Назарова, к.э.н., доц. (РУДН, Москва)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ БОЕВОГО ЗАДАНИЯ ОПЕРАТОРА БПЛА В НОТАЦИИ BPMN

Моделирование процессов в различных нотациях позволяет наглядно представить алгоритмы и последовательность действий, что позволяет сделать рассматриваемые процессы понятными для различных профильных и непрофильных специалистов. Использование моделирования позволяет автоматизировать и улучшить рассматриваемые процессы. В рамках работы авторами был рассмотрен процесс выполнения боевого задания оператора БПЛА согласно открытым и доступным источникам информации. Авторы работы разработали диаграмму рассматриваемого процесса в нотации BPMN согласно ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020 [1]. Основными преимуществами нотации BPMN является наглядность, визуализация, возможность упрощенного выявления, а также оптимизации слабых и узких мест рассматриваемого процесса при этом являясь международным признанным языком коммуникации между различными специалистами, управленцами и планировщиками процессов. Также модели, созданные в нотации BPMN, возможно напрямую использовать в системах управления процессами для автоматизации.

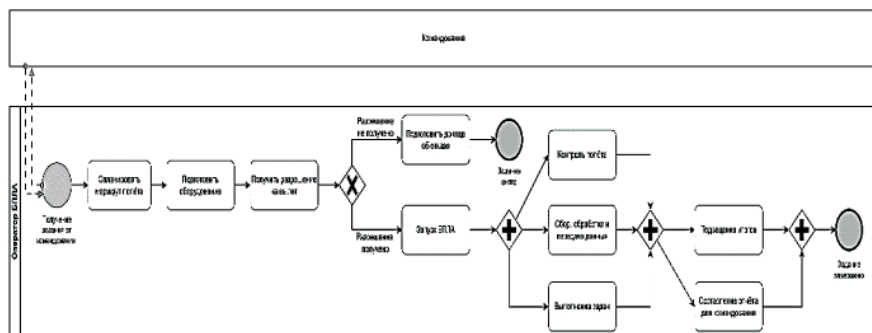


Рис. 1. Диаграмма процесса выполнения боевого задания оператора БПЛА

Литература

1. **ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020.** По техническому регулированию и метрологии. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Часть 3. Информационные потоки в процессах производственного планирования. Москва. Стандартинформ. — 2020.

П.Н. Мелешко, А.И. Мартынов, А.Д. Разорвин, студ.;
рук. Г.Р. Сайпулаев, к.т.н. (НИУ «МЭИ», Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО SLAM В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОЛЁСНОГО РОБОТА

Развитие систем навигации и управления движением для автономных колёсных роботов требует учёта неровностей опорной поверхности, так как уклоны, пороги и ямы ограничивают допустимые области перемещений и скорости движения робота. Пренебрежение формой неровностей при планировании движения робота могут приводить к потере устойчивости или опрокидыванию робота. Наиболее распространенным решением для оценки пространственных препятствий, включая рельеф, являются лидары (LiDAR), которые существенно увеличивают себестоимость и энергопотребление робота.

Для создания перспективных роботов представляет интерес использование стереокамеры и методов визуального SLAM для оценки рельефа и выбора безопасной траектории. Цель работы — разработка метода построения локальной карты рельефа с использованием алгоритма ORB-SLAM3 [1] и стереокамеры, установленной на колёсной платформе, для применения этой карты в задаче планирования движения [2].

Алгоритм ORB-SLAM3 в среде ROS 2 обеспечивает оценку положения и ориентации камеры. На основе данных глубины формируется локальное облако точек перед роботом, которое проецируется на регулярную сетку над плоскостью опорной поверхности. Для каждой ячейки вычисляются средняя высота и перепады высот с соседними ячейками, по которым определяется уклон и показатель неровности. На основе рассчитанных параметров каждая ячейка сетки относится к одной из трёх зон: безопасной, нежелательной или запретной для движения.

По полученной карте система планирования движения генерирует маршрут с учетом обхода областей с большим уклоном и резкими перепадами высот. А система управления движением формирует команд управления на рулевой привод и колёса, обеспечивающие перемещение по последовательности целевых точек маршрута.

Литература

1. Campos C., Elvira R., Rodriguez J.J.G., Montinel J.M.M., Tardos J.D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial and Multi-Map SLAM // IEEE Transactions on Robotics. — 2021. — Vol. 37, No. 6. — P. 1874–1890. DOI: 10.1109/TRO.2021.3075644
2. Yang L., Li P., Qian S., Quan H., Miao J., Liu M., Hu Y., Memetimin E. Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review // Machines. — 2023. — Vol. 11, No. 10. — ArticleID 980, 46 p.

В.А. Текотова, студ.; рук. В.Л. Елисеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТЯХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Современная криптография сталкивается с серьёзными вызовами, связанными с развитием квантовых вычислений. Классические асимметричные алгоритмы, такие как RSA и Diffi-Hellman, уязвимы к атакам на квантовых компьютерах, что создаёт угрозу для долгосрочной безопасности данных. В качестве альтернативы активно развивается квантовое распределение ключей (КРК), безопасность которого основана на фундаментальных законах квантовой механики. Однако КРК имеет физически обусловленные ограничения в расстоянии, на котором может осуществляться квантовое распределение ключей. Для волоконно-оптической среды передачи в топологии «точка-точка» это расстояние не превышает 100–150 км из-за затухания сигнала и невозможности его усиления без нарушения квантовых состояний. Для преодоления обозначенного ограничения строят масштабируемые сети КРК с доверенными промежуточными узлами (ДПУ), позволяющих преодолевать ограничения дальности и создавать сложные сетевые топологии [1].

Актуальной задачей для сетей КРК со сложной топологией является разработка эффективного алгоритма маршрутизации, который должен обеспечить максимальную пропускную способность сети с учетом допустимой нестабильности в скорости генерации квантовых ключей на сегментах сети КРК и наличии конкурирующих запросов на построение маршрута. Для решения обозначенной задачи был проведен анализ существующих алгоритмов маршрутизации на графах и исследован вопрос выбора эффективной метрики на сегменте сети КРК. Классические алгоритмы маршрутизации основаны на понятии о пропускной способности, как метрики сегмента, но для сетей КРК могут применяться различные метрики, такие как Speed Key Rate (SKR) — скорость генерации ключа и Quantum Bit Error Rate (QBER) — уровень квантовых ошибок.

Методология проведенного исследования заключается в сравнении результатов имитационных экспериментов применения алгоритмов маршрутизации на сетях КРК нескольких различных топологий и с различными метриками. Полученные результаты позволяют выбрать наилучший алгоритм маршрутизации и использовать подходящую метрику в больших сетях КРК, таких как магистральная квантовая сеть ОАО «РЖД».

Литература

1. **Елисеев В.** Сети квантового распределения ключей — новый уровень сервисов информационной безопасности национальной сети Интернет / В. Елисеев // Интернет изнутри. — 2024. — № 20. — С. 10–15.

Д.Б. Ключковский, студ.;
рук. М.Ю. Косинский, доц., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ДВИГАТЕЛЯМИ-МАХОВИКАМИ

Актуальность задачи стабилизации и ориентации космических аппаратов (КА) обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности управления для выполнения целевых операций, таких как наведение научных приборов, коррекция орбиты и поддержание энергопритока [1]. Одним из перспективных методов управления является использование двигателей-маховиков, которые позволяют создавать управляющие моменты без расхода рабочего тела.

В ходе работы проведено исследование динамики космического аппарата как объекта управления в трёхмерном пространстве [2]. Рассмотрены кинематические и динамические модели, включая уравнения Эйлера и описание вращательного движения с использованием кватернионов. На основе тензора инерции и параметров КА выполнено математическое описание системы.

Разработана структурная схема системы стабилизации с двигателями-маховиками, включающая объект управления, регулятор и исполнительные органы. Проведена настройка параметров системы, обеспечивающая заданное качество переходных процессов и устойчивость.

Особое внимание уделено анализу влияния перекрёстных связей между каналами управления на точность стабилизации. Показано, что для улучшения динамических характеристик системы требуется учитывать их влияние при настройке параметров регулятора.

Разработанная система была реализована и исследована в среде моделирования Simintech.

Результаты моделирования подтвердили работоспособность системы в трёхмерном случае. Обеспечены требуемые характеристики системы: время переходного процесса, перерегулирование и точность. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования систем управления перспективных космических аппаратов.

Литература

1. Бортвые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Под редакцией А.С. Сырова — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — 304 с.
2. **Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г.** Управление космическими летательными аппаратами. М., «Машиностроение», 1974, 340 с.

И.А. Тархов, студ.;

рук. К.А. Неусыпин, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

Внедрение автономного транспорта сопряжено с обеспечением безопасного взаимодействия ТС (транспортного средства) с динамическими объектами, без надёжной оценки скорости которых невозможны построение модели их поведения и планирование безопасного маршрута [1]. В отличие от дорогостоящих компонентов, стереоскопическая камера более дешева и способна выступать как самодостаточный датчик.

Алгоритм оценки скорости основан на использовании изображений со стереоскопической камеры, алгоритмов компьютерного зрения и нейронных сетей. Алгоритмы компьютерного зрения применены для определения пространственного положения точек изображения.

Нейронные сети задействованы в задачах обнаружения и сопровождения объектов на последовательности изображений: YOLO (you only look once) — в алгоритме обнаружения объектов, сеть-энкодер с более универсальной архитектурой в сравнении с [2] — в алгоритме сопровождения объектов deepSORT (deep-learn simple online and real-time tracking).

В отличие от [3], уделено внимание фильтрации полученной информации при помощи фильтра скользящего среднего и фильтра Калмана с целью сгладить соответствующие временные ряды расстояний до отслеживаемых объектов, численное дифференцирование которых позволило оценить их скорость.

Используемые современные подходы к сопровождению объектов позволяют применять стереокамеру как дополнительный или самостоятельный источник информации о скорости динамических объектов, что помогает корректировать скорость ТС и принимаемые решения в режиме реального времени.

Литература

1. **Епифанов В.В., Визгалин С.Е., Статенин А.О.** Внедрение и эксплуатация беспилотных автомобилей // Вестник УлГТУ. 2023. Т. 104. № 4. С. 43–50.
2. **Wojke N., Bewley A., Paulus D.** Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1703.07402>.
3. **Yang L., Menglong L., Song X., Zixiang X., Hou C., Qu B.** Vehicle Speed Measurement Based on Binocular Stereovision System // IEEE Access. 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932120

*С.В. Кирьянов, Е.С. Щербак, А.М. Наумова,
А.Д. Купцов, И.В. Артемьев, студенты;
рук. С.В. Сидорова, к.т.н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК И СТРУКТУР

В условиях развития нанoeлектроники возрастает потребность в быстром и точном подборе режимов формирования наноразмерных пленок и структур без проведения большого числа пробных осаджений. Геометрия покрытий (толщина, латеральный размер структур и компонентов) напрямую определяет чувствительность и стабильность характеристик устройств, поэтому актуальна задача прогнозирования этих параметров и выбора технологических режимов для их обеспечения.

Цель работы — разработка составной нейросетевой модели на основе многослойного персептрона для прогнозирования толщины и латерального размера наноструктур в плёнках Mo, Al, Ag, оксидов SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 по параметрам осаждения (материал, метод, время, ток, расход газа). Модель представлена в виде специализированных ветвей, объединённых в единую архитектуру с общим входом и скалярным выходом, соответствующим целевому геометрическому параметру.

Показано, что для оксидных плёнок нейросетевая ветвь обеспечивает предсказание толщины со средней относительной ошибкой порядка 12% (15,2% для SiO_2 , 6,7% для Al_2O_3 и 13,7% для TiO_2), а для кристаллитных плёнок Mo латеральный размер восстановлен с погрешностью около 13% на независимых режимах. Для Al и Ag реализованы демонстрационные ветви, что подчёркивает необходимость расширения экспериментальной базы, но уже показывает возможность включения новых материалов в единую модель без изменения её архитектуры.

Разработанный подход позволяет использовать нейросети как инструмент ускоренного технологического поиска, сужая область подбираемых режимов и сокращая объём дополнительных исследований при проектировании тонкоплёночных структур. По мере накопления экспериментальных данных модель может дообучаться, превращаясь в самообновляемый «банк знаний» по режимам формирования покрытий [1].

В перспективе интеграция такой нейросетевой модели с физическими моделями туннельного транспорта и цифровым двойником вакуумной установки позволит напрямую связывать технологические параметры с целевыми электрическими характеристиками нанoeлектронных устройств.

Литература

1. **Ш Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. — 2-е изд. — М. : Вильямс, 2006. — 1104 с.

С.А. Филатов, асп.; рук. В.Л. Елисеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕЛЕФОННЫХ ОБРАЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ПОИСКОВОЙ ДОПОЛНЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Современные системы автоматического распознавания речи (ASR) требуют многоэтапного обучения: предварительного обучения на больших общих наборах данных с последующим дообучением на предметно-ориентированных выборках [1]. Такой подход обеспечивает высокую точность, но связан со значительными вычислительными затратами. При работе со специфическими терминами, сбор достаточного количества размеченных данных для эффективного дообучения становится практически невыполнимой задачей.

В последние годы в машинном обучении активно развиваются альтернативные подходы к адаптации моделей: zero-shot, one-shot и few-shot обучение, позволяющие минимизировать этап дообучения [2]. Их применение к ASR в специфических предметных областях требует решения проблемы интеграции предметных знаний в процесс генерации транскрипции.

Для повышения точности распознавания телефонных обращений в данной работе предлагается конвейер обработки, объединяющий технологии ASR, больших языковых моделей (LLM) и поисковой дополненной генерации (RAG). После получения первичной транскрипции с помощью ASR-модели, система извлекает релевантные термины и контекстные подсказки из предметной базы знаний через механизм RAG, а затем применяет LLM в режиме zero-shot обучения для корректировки результатов. Экспериментальная оценка показала существенное улучшение распознавания специфических терминов: например, для «минобрнауки» точность возросла до 80%, для «сбиас» — на 30%. Основным ограничением подхода является склонность LLM к генерации избыточных слов, что требует дальнейшей оптимизации промптов.

Литература

1. **Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K.** BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // arXiv:1810.04805
2. **Brown T.B. et al.** Language Models are Few-Shot Learners // arXiv:2005.14165

*Н.П. Коренко, С.Л. Мыльникова, В.А. Пичугов, студ.
(Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург);
рук. О.В. Кубряк, д.б.н. (НИУ «МЭИ», г. Москва)*

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭЭГ И ЭМГ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ “ЧЕЛОВЕК-МАШИНА”

Развитие биоуправляемой робототехники и средств нейрореабилитации требует инструментов комплексной оценки состояния оператора [1]. В работе представлен разработанный программный комплекс, объединяющий алгоритмы обработки данных ЭЭГ и поверхностной ЭМГ для задач адаптивного управления. Программный комплекс реализован в виде модульной системы, где модули отвечают за реализацию отдельных функциональных элементов программного комплекса.

Модуль нейрофизиологического анализа реализует многоступенчатую очистку сигнала ЭЭГ с использованием следующих фильтров: FIR, полосового, медианного, Савицкого-Голея, а также проводит частотно-временной анализ на основе вейвлета Морле. Ключевой функцией является оценка функциональной связности мозга (метрика PLV) с построением графовых моделей и топографическим картированием. Это позволяет в реальном времени выделять устойчивые нейромаркеры когнитивной нагрузки и корковой активности, связанной с обработкой искусственной сенсорной обратной связи.

Модуль анализа моторики автоматизирует расчет амплитудно-частотных характеристик и статистическую оценку динамики адаптации (критерии Фридмана, Вилкоксона) с предварительной фильтрацией по умолчанию с помощью полосового фильтра Баттерворта и вейвлет-преобразования с функцией Добеши порядка 4. Встроенный факторный анализ обеспечивает выявление паттернов активности мышц и головного мозга, возникающих при поддержании равновесия.

Интеграция алгоритмов в единой среде позволяет моделировать эффекты «сенсорного перевеса» и создавать системы управления, адаптирующие параметры робота к текущему психофизиологическому статусу человека [1].

Литература

1. **Кубряк О.В., Ковальчук С.В.** Искусственный сенсорный компонент в системе человек — машина с комбинированной обратной связью // Проблемы управления. — 2024. — № 6. — С. 27–37.

Д.В. Човен, асп.; рук. В.Л. Елисеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА КРИТЕРИЕВ ДОВЕРИЯ К КЛАССИФИКАТОРУ

Глубокие нейронные сети нашли широкое применение в решении множества задач анализа данных. Чувствительность моделей машинного обучения к состязательным атакам и отравлению данных вводит ряд ограничений [1] на их внедрение в критически важных системах принятия решений.

Традиционные метрики оценки качества классификаторов основываются на анализе матрицы ошибок в пределах фиксированных обучающих и тестовых выборок. Данный подход не отражает поведение классификатора за пределами целевой области принятия решений (ЦОПР), заданной обучающим множеством. Для получения комплексной оценки необходимо определить фактическую область принятия решений (ФОПР) и сопоставлять её с определённой ЦОПР. Описанный подход позволяет оценить уязвимость модели к состязательным атакам.

В работе [2] были введены показатели качества одноклассовых классификаторов — EDCA, позволяющий провести подобную оценку. Также было разработано расширение на многоклассовые классификаторы EDCAP. Теоретически расчет характеристик требует определения областей, занимаемой обучающими данными и классифицируемого пространства, а также выполнения теоретико-множественных операций над этими областями и вычисление объёмов этих областей в многомерном пространстве. Практический же расчет требует дискретизации пространства, что актуализирует задачу задания шага, который бы позволял рассчитать области и объёмы наиболее точно. Представляется важным исследование подходов для определения оптимального шага дискретизации пространства признаков.

В данной работе рассматриваются подходы определения оптимального шага дискретизации на реальных данных малой размерности, проводится сопоставление с результатами предыдущих исследований. Приводятся примеры расчётов характеристик EDCA для нескольких наборов данных.

Литература

1. **Namiot D., Ilyushin E.** On the reasons for the failures of machine learning projects // International Journal of Open Information Technologies. — 2023. — Т. 11. — №. 1. — С. 60–69.
2. **Гурина А.О., Елисеев В.Л.** Эмпирический критерий качества одноклассового классификатора // Информационные системы и технологии (ИСТ-2021). — 2021. — С. 648–657.

Секция 18

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Computer-measuring systems

Председатель секции: д.т.н., профессор Желбаков Игорь Николаевич

Секретарь секции: к.т.н., доц. Серов Андрей Николаевич

Е.Н. Митин, студ.; рук. А.А. Лупачев, к.т.н., доц.(НИУ «МЭИ»)

КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Температурные испытания силовых трансформаторов (СТ) проводятся по методике согласно стандарта [1]. Анализ литературы позволяет сделать вывод о наличии определённых проблем при определении установившегося значения температуры (УЗТ) СТ [2–4].

Упростить решение измерения УЗТ позволяет экспоненциальная модель нагрева ТС в соответствии с теорией регулярного теплового режима профессора Г.М. Кондратьева. В терминах этой теории понятие УЗТ эквивалентно понятию стационарный режим, определяемый как последняя стадия нагрева сложного тела [5]. В таком виде критерий, согласно классификации интервальных критериев (ИК), отнесён к виду составных ИК. В этих критериях результат решения о стационарности принимается на основе анализа переходного процесса на трёх-пяти интервалах наблюдения за процессом [5]. Недостовверное использование таких критериев приводит либо к неточной динамической модели теплового процесса в СТ, либо к значительным временным и экономическим потерям при испытаниях [6]. Задачей настоящих исследований является: обосновать целесообразность применения рекомендуемого в стандартах числа интервалов наблюдения для достижения установившегося значения температуры исследуемого объекта.

В работе проведён анализ критериев на степень удовлетворения требуемого уровня динамической погрешности измерения УЗТ.

Литература

1. **ГОСТ 3484.2–84.** Трансформаторы силовые. Испытания на нагрев. // М.: ИПК Изд-во Стандартов, 1996. — 39 с.
2. **Гарасько Г.И., Дулькин И.Н.** Определение установившегося превышения температуры и постоянных времени по данным тепловых испытаний трансформаторов. *Электротехника*, № 4, 2010. — С. 20–29.
3. **Zdenko Godec.** Steady-State Temperature Rise Determination. // *Automatika*. 33. 1992. — pp. 129–134.
4. **J.W. Welch.** Assessment of Thermal Balance Test Criteria Requirements on Test Objectives and Thermal Design. // 46th International Conference on Environmental Systems, 10–14 July, 2016. Vienna, Austria. — 13 p.
5. **ГОСТ 31925–2011.** Методы определения термического сопротивления на приборах с горячей охранной зоной и оснащенных тепломером. — М.: Стандартинформ, 2014. — 47 с.
6. **Мироновский Л.А., Слаев В.А.** Инвариантные соотношения между средними из малых выборок. // *Измерительная техника*, № 2, 2014. — С. 27–32.

*И.Д. Продьма, студ. (НИУ ВШЭ, Москва);
 А.М. Шейнкин, студ. (НИУ ВШЭ, Москва);
 М.А. Федотов, студ. (НИУ МЭИ, Москва);
 рук. А.Л. Тув, ст. преп. (НИУ ВШЭ, Москва)*

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОБРАТНОХОДОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЕГО МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Целью работы является разработка цифрового двойника[1] обратноходового импульсного преобразователя напряжения на базе ШИМ-контроллера UC3842 (ОИПН), методики проведения его испытаний с целью валидации модели, а также ключевые параметры, точки схемы и способы получения их значений.

Была спроектирована и собрана схема ОИПН, создана компьютерная модель устройства в системе моделирования LTSpiceXVII (Рисунок 1), а также разработана принципиальная электрическая схема блока датчиков, для сбора и обработки параметров ОИПН.

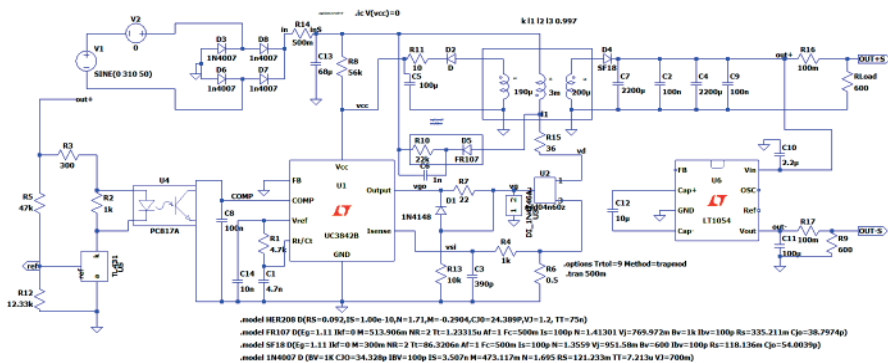


Рис. 1. Модель ОИПН в среде моделирования LTSpiceXVII

Для расчёта погрешностей и проведения валидации модели, требуется провести ряд испытаний ОИПН в соответствии со стандартами ИЕС 61558-1-2009[2] и ИЕС 61558-2-16-2013[3]. Планируется провести серии из 9 типов испытаний, представляющие собой работу ОИПН в различных комбинациях входных и выходных параметров.

Литература

1. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
2. ГОСТ ИЕС 61558-1-2009 «Безопасность силовых трансформаторов, блоков питания, реакторов и аналогичных изделий».
3. ГОСТ ИЕС 61558-2-16-2013 «Дополнительные требования и методы испытаний импульсных блоков питания и трансформаторов для импульсных блоков питания».

*М.А. Федотов, студ.; В.А. Елькин, студ.;
рук. А.Л. Тув, ст. преп. (МИЭМ НИУ ВШЭ)*

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ЗАДАННЫМИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Задача измерения линейных перемещений является одной из актуальных задач измерительной техники. К недостаткам большинства контактных методов измерения перемещений является влияние характеристик измерителя на результат измерения. Более перспективными методами измерения, являются бесконтактные, т.к. они не оказывают воздействия на объект измерения. Среди известных методов бесконтактного измерения перемещений особое место занимают волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией потока излучения измеряемой величиной. Преобразователи обладают нечувствительностью к воздействию электромагнитных помех, что способствует их широкому распространению на производстве.

Целью работы является разработка методики получения преобразователей с заранее заданными метрологическими характеристиками (прежде всего с заданной чувствительностью и диапазоном измерений). Для этого на основании математической модели разработана компьютерная модель преобразователя в фреймворке Q_4 на языке C++, позволившая решить задачу анализа: по заданным конструктивным параметрам датчика построить его функцию преобразования.

Обратная задача синтеза — это определение параметров датчика, обеспечивающих необходимую чувствительность и диапазон. Задача решается многократным прогоном компьютерной модели с разными входными данными до получения удовлетворительного приближения к заданным характеристикам. Таким образом, предложенная методика и инструментарий позволяют существенно сократить время и ресурсы на проектирование оптических датчиков перемещений с заданными характеристиками.

Литература

1. **Зак Е.А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. **Опекунова А.А, Старостенко В.И., Тув А.Л, Акатов М.С.** Разработка программно-аппаратного комплекса регистрации вибрации. XIX Международная научно-практическая конференция, Часть 1 // В-Спектр, Томск, 2023.

А.Д. Щербак, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКЗ МЕТОДОМ ПО ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Точное измерение среднеквадратического (СКЗ) значения сигнала является одной из базовых задач и в энергетике и в системах управления. В текущих условиях развития инженерии необходимо, чтобы измерения амплитуды сигнала проходили с высокой точностью и малое время. Высокую скорость измерения обеспечивает метод по второй производной сигнала [1], однако с предельной достигаемой точностью есть сложности.

Данный метод основан на свойствах дифференцирования сигнала синусоидальной формы. Для такого сигнала дифференциальное уравнение, лежащее в основе метода, имеет вид: $s'' = -\omega_0^2 s$, откуда можно получить алгоритм оценки амплитуды сигнала: $A = s^2 + (s\omega_0^2)$. Здесь s — отсчёты сигнала; s'' — отсчёты его второй производной; ω_0 — частота сигнала. Данный метод содержит погрешность численного дифференцирования, погрешность, возникающую вблизи отсчетов близких к нулю и погрешность, обусловленную отличием формы сигнала от синусоидальной. Для уменьшения последней погрешности следует использовать пост-обработку, к которой относится метод наименьших квадратов (МНК). Так как на выходе мы получаем амплитудное значение, постоянное во времени, то аппроксимирующая функция должна иметь вид (используем полином нулевого порядка): $A = a$, где a — постоянный коэффициент, получаемый в результате применения МНК.

С помощью пакета имитационного моделирования Simulink была построена модель измерительного преобразователя СКЗ данного типа с учетом рассмотренной модификации. Для реализации сглаживания по методу наименьших квадратов в программе Simulink был использован блок Polifyt, а также блок Buffer, используемый для накопления получаемых дискретных значений сигнала и последующей передачи их в блок Polifyt. Результаты моделирования показывают, что применение МНК позволяет снизить погрешность измерения СКЗ в десятки раз.

Литература

1. **Zayezdny A.M.** A new method of signal description and its applications to signal processing / A.M. Zayezdny, I. Druckmann // Signal Processing. — 1991. — Vol. 22, № 2. — P. 153–178.
2. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей: учебник для вузов / Е.С. Вентцель. — 4-е изд., стер. — М.: Наука, 1969. — 357 с.

Е.А. Лосихина, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКЗ МЕТОДОМ ПО ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Измерение среднеквадратического значения (СКЗ) сигнала, повышение его точности и сокращение времени измерения являются первичными задачами в электроэнергетике и смежных областях. Оптимальное время измерения сигнала можно обеспечить применением метода по второй производной, что требует повысить точность с помощью пост-обработки.

Метод использует соотношения между производными, и мгновенным значениями измеряемого сигнала синусоидальной формы [1]. Для случая синусоидального входного сигнала оценка амплитуды сигнала для отсчёта n : $A_n = [s_n^2 - s_n s_n''^2 / s_n'']^{1/2}$, где s_n — отсчёт n входного сигнала, s_n' , s_n'' — первая и вторая производные сигнала. При использовании такого подхода требуется бороться с рядом факторов, приводящих к появлению прочих погрешностей: деление на близкие к нулю значения второй производной, появления в реальном сигнале шумов и гармоник [2]. Для подавления погрешности, вызванной шумом, произведем пост-обработку с использованием фильтра скользящего среднего (ФСС). В основу ФСС положено усреднение нескольких отсчётов. Длина окна N влияет как на сглаживание шума, так и на сохранение исходной формы сигнала. Увеличение длины фильтра эффективно подавит шум, но увеличит время измерения; снижение длины не способствует подавлению погрешностей от гармоник и шумов сигнала, но сохранит высокие динамические характеристики метода. Рекурсивная формула, реализующая фильтр скользящего среднего [2]:

$$A_{(\Phi, N)}[n] = A_{(\Phi, N)}[n-1] - A[n-N] / N + A[n] / N,$$

где $A[n]$ — n -ый отсчёт амплитуды, $A_{(\Phi, N)}[n]$ — отсчёт результата измерения амплитуды после сглаживания.

Построенная для реализации ФСС подсистема Simulink написана с применением стандартных блоков Gain, Add, Delay и вычисляет $A_{(\Phi, N)}[n]$ рекурсивным методом для заданного N . Подсистема была протестирована на сигнале, зашумлённом неосновной гармоникой с заданной частотой 150 Гц. Показано, что применение ФСС вместе с методом измерения частоты сигнала по второй производной позволяет на порядок снизить погрешность измерения СКЗ.

Литература

1. **Zayezdny A.M.** A new method of signal description and its applications to signal processing / A.M. Zayezdny, I. Druckmann — 1991. — Vol. 22, № 2. — P. 153–178.
2. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений — 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — XI, 756 с.

Г.Н. Налбандян, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО АМПЛИТУДНОМУ СПЕКТРУ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ОКНА

Измерение частоты — одна из основных задач электроэнергетики. Среди цифровых методов измерения можно выделить методы анализа во временной и частотной областях. Основным недостатком метода в частотной области является необходимость измерения спектра и обеспечение компенсации влияния эффекта растекания спектра [1].

Основная идея метода состоит в нахождении его амплитудного спектра с помощью ДПФ и определения в истинного положения основной спектральной компоненты, соответствующего значению частоты. В данной работе будут использоваться алгоритмы БПФ, поскольку они позволяют обрабатывать большие объёмы данных за меньшее время, обеспечивает одновременный анализ всего частотного диапазона и легко интегрируется с методами снижения растекания спектра, к примеру, сочетание с оконными функциями. Применение оконной функции состоит в умножении её отсчётов на отсчёты входного сигнала. Для случая применения прямоугольного окна значение относительного отклонения частоты от положения максимального спектрального отсчёта определяется соотношениями (для двухточечной (1) и трехточечной аппроксимаций (2)):

$$\theta_{R,2} = s \frac{|H[i_m + s]|}{|H[i_m + s]| + |H[i_m]|} \quad (1)$$

$$\theta_{R,3} = \frac{s(|H[i_m + 1]| + |H[i_m - 1]|)}{2|H[i_m]| + s(|H[i_m + 1]| + |H[i_m - 1]|)} \quad (2)$$

С помощью пакетов имитационного моделирования MatLab и Simulink построены модели, позволяющие сравнить оценки методической погрешности метода для оценки их достоверности. Результаты получены для случая выполнения аппроксимации по двум и трём спектральным отсчётам при рассмотрении синусоидальных и полигармонических входных сигналов. Результаты имитационного моделирования показывают, что повышение числа учитываемых спектральных отсчётов приводит к повышению конечной точности измерения.

Литература

1. Подобуев С.А., Кривопускова А.С., Логинов В.А., Чумаченко Д.А., Шатохин А.А., Серов А.Н. Универсальный подход для измерения частоты электросети с помощью амплитудного спектра при применении оконных функций для снижения эффекта растекания спектра. Южно-Сибирский научный вестник. 2025 № 3 (61). С. 3–15.

И.С. Лукьянов, студ.; рук. С.И. Герасимов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНЫЙ АССИСТЕНТ В РАСЧЁТЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Измерительные усилители (ИУ) [1] являются важными компонентами в области информационно-измерительной техники. Они обеспечивают усиление слабых сигналов, поступаемых от датчиков, обеспечивая высоким входным сопротивлением. Ручной расчёт, особенно применительно к анализу точности, является трудоёмким и подвержен ошибкам. Использование современных программных инструментов позволяет существенно упростить и автоматизировать процесс моделирования и анализа метрологических характеристик ИУ [1].

Цель работы состоит в расчёте электрической схемы ИУ постоянного напряжения, построенного на базе операционного усилителя по схеме решающего усилителя с неинвертирующим включением [1, 2].

Операционный усилитель [1] может быть представлен в двух вариациях: идеализированный и приближенный к реальной модели. Непосредственно все электрические элементы, измерительные приборы и источники сигнала представляются в виде эквивалентных функциональных схем с учётом их основных технических характеристик. При моделировании элементы схемы реализованы как соответствующие виртуальные устройства и электрические компоненты [2] с описанием топологии цепи на языке, совместимом с SPICE. Для этой цели предлагается использовать расширение языка Python в виде специальной библиотеки PySpice [3].

В задачи программного ассистента входит расчёт номинального и фактического коэффициентов передачи решающего усилителя, оценка предельных значений погрешности ИУ, приведённых ко входу и выходу.

В результате работы на языке Python был разработан программный ассистент, в соответствии с поставленными требованиями. Все проводимые вычисления автоматизированы с применением программных инструментов в Jupyter Notebook.

Литература

1. Дж. Грэм, Дж. Тоби, Л. Хьюлсман. Проектирование и применение операционных усилителей. — М.: Мир, 1974.
2. Д. Крекرافт, С. Джерджи. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала. — М.: Техносфера, 2005. — 360 с.
3. Описание библиотеки PySpice [электронный ресурс]: <https://pyspice.fabrice-salvaire.fr/releases/v1.4/overview.html> (дата обращения: 21.11.2025)

М.В. Ласо, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПО ТРЁМ ОТСЧЁТАМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА С ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Задача точного и быстрого измерения частоты синусоидальных сигналов является одной из ключевых в электроэнергетике, системах связи и управления. Метод трех отсчётов обладает рядом принципиальных преимуществ, определяющих области его эффективного применения, а также имеет существенные ограничения, требующие специальных мер компенсации. Одним из источников погрешности в базовом методе [1] является наличие постоянной составляющей и ее устранение достигается либо фильтрацией, либо модификацией измерительного алгоритма.

Для компенсации влияния постоянной составляющей A рассмотрим синусоидальный сигнал с постоянным смещением вида: $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) + A$. Возьмем четыре отсчета этого сигнала (такой сигнал содержит четыре неизвестные) и запишем соответствующую систему уравнений (u_1, u_2, u_3, u_4). Вычитая из уравнения u_1 уравнение u_4 , а из уравнения u_2 уравнение u_3 , мы избавляемся от неизвестной константы и получаем систему из двух уравнений с одной неизвестной. Далее делим верхнее уравнение на нижнее, избавляясь от амплитуды сигнала U_m . Решая, получаем итоговую формулу, из которой выразим ω :

$$\omega = 2 \cdot \arcsin \left(\sqrt{\frac{C - 3}{-4}} \right) / T_s,$$

где $C = 3 - 4\sin^2(\omega T_s/2)$ — результат решения уравнения, а T_s — шаг дискретизации.

Для решения задачи устранения влияния постоянной составляющей была предложена модификация алгоритма, основанная на использовании четырёх последовательных отсчётов сигнала. Для оценки эффективности предложенного метода была выполнена имитационная модель, построенная в среде Simulink. Модель реализует сравнительный анализ классического и модифицированного алгоритмов, подтвердивший, что новая методика полностью компенсирует погрешность от постоянной составляющей в условиях синусоидального входного сигнала и демонстрирует лучшую устойчивость к входным шумам произвольного вида.

Литература

1. **A.M. Zayezdny, Y. Adler and I. Druckmann**, "Short time measurement of frequency and amplitude in the presence of noise," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 41, no. 3, pp. 397–402, June 1992.

А.А. Чиркова, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ МЕТОДА ПО ПРИРАЩЕНИЮ ФАЗЫ ПУТЕМ ПОДСТРОЙКИ ЧИСЛА ОТСЧЕТОВ

В настоящее время, измерение частоты в электросети является одной из важнейших задач. Для её измерения существует множество цифровых методов, один из них — метод по приращению фазы [1]. Ключевое преимущество данного метода — высокая точность и относительная простота реализации, однако он чувствителен к эффекту растекания спектра, который приводит к появлению погрешности в оценке мгновенной фазы, что существенно снижает конечную точность измерения.

Метод измерения частоты по приращению фазы основан на последовательном вычислении мгновенной фазы сигнала с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и нахождении ее производной во времени. Для снижения методической погрешности существует множество методик пост-обработки среди которых: низкочастотная фильтрация; усреднение результатов измерения частоты; подстройка шага дифференцирования и другие. Но применение данных методик осложнено увеличением общего времени измерения. Среди альтернативных подходов — воздействие на саму природу погрешности, через снижение эффекта растекания спектра путем подстройки числа отсчётов.

В данной работе исследуется метод повышения точности измерения частоты путем подстройки числа отсчетов, который вычисляет длину окна ДПФ, при котором эффект растекания спектра проявляется минимальным образом (период измеряемого сигнала должен быть кратен времени измерения). Для вычисления оптимальной длины окна используется результат измерения частоты, полученный самим методом измерения. После производится подстройка длины окна для нового числа отсчетов.

Для оценки эффективности данного метода была разработана имитационная модель в программной среде Simulink. Построенная модель базируется на реализации ДПФ как дискретной фильтрации с подстройкой длины ДПФ, что позволило оценить методическую погрешность, вызванную эффектом растекания спектра. Результаты проведенного имитационного моделирования продемонстрировали существенное снижение погрешности за счёт минимизации эффекта растекания спектра с помощью метода по подстройке числа отсчетов.

Литература

1. **Коршунов В.В., Серов А.Н.** Способы повышения точности измерения частоты при применении метода, основанного на анализе приращения фазы. Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3 (49). С. 114–120.

Н.Е. Моисеенко, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПУТЕМ УСРЕДНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ МЕТОДА ПО ПЕРЕХОДУ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ НУЛЬ

В современном мире, где электронные устройства играют важную роль, измерение частоты электрического сигнала является одной из ключевых задач. Метод измерения, основанный на переходах сигнала через ноль, позволяет эффективно измерять частоту как синусоидальных, так и полигармонических сигналов, но погрешность измерения растет в случае появления входного шума [1]. Основная идея метода заключается в следующем: по переходам сигнала через ноль определяется целое число периодов входного сигнала, по значениям которого косвенным образом можно определить частоту. Событие перехода через ноль определяется как смена знаков отсчетов сигнала или же смена знака произведения двух соседних отсчетов. Определять это событие можно по фронту или срезу сигнала, то есть для интервала изменения сигнала во времени с отрицательного на положительное значение. Данный метод чувствителен к колебаниям сигнала и влияниям шума вблизи переходов через ноль, что затрудняет определение моментов переходов. Для устранения шумов можно использовать входную фильтрацию или усреднение по методу наименьших квадратов, а для повышения точности определения переходов — линеаризацию в окрестностях перехода сигнала через ноль.

Предлагаемая модификация основана на усреднении результатов измерения частоты, полученных для отдельных периодов входного сигнала. Выполнено сравнение достигаемой точности с подходом, при котором выполняется одно измерение для всего рассматриваемого времени наблюдения, которое включает большое число периодов входного сигнала.

Для оценки эффективности модификации была построена имитационная модель в программном пакете Matlab, сравнение методик было проведено для условий синусоидальных и полигармонических входных сигналов. В результате выполнения имитационного моделирования было выяснено, что основными источниками погрешности являются влияние шумов, влияние гармоник, дискретность по времени в определении момента перехода.

Литература

1. **K.A. Ivanenko, A.N. Serov.** «Zero-Crossing Technique Modification for the Frequency Measurements of Real Power Grids,» 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 106–109.

М.И. Мишкин, студ.; рук. С.И. Герасимов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА СИГНАЛОВ В PYTHON

Одной из ключевых задач в радиоэлектронике и электротехнике является точное измерение параметров электрических сигналов [1], таких как частота и период. Традиционно для этого используются осциллографы и частотомеры, однако создание их виртуальных аналогов открывает новые возможности для обучения и проведения научных экспериментов.

В рамках научно-исследовательской работы была поставлена задача разработать программный комплекс на языке Python, имитирующий работу аналогового осциллографа и цифрового частотомера ЧЗ-75 для выполнения лабораторной работы № 13 общего курса метрологии [2]. Основные цели включали: моделирование электрических цепей и сигналов заданной формы, визуализацию осциллограмм, реализацию логики измерения частоты и периода с учетом требуемых погрешностей. Применение программных библиотек на языке Python в рамках задачи может упростить процесс вычислений и повысить удобство вывода полученных результатов.

Для решения поставленной задачи был применен набор следующих программных инструментов. Генерация и анализ сигналов [3] выполнялись с помощью Python-совместимых библиотек NumPy и SciPy [4]. Визуализация результатов, включая построение графиков сигналов и осциллограмм, осуществлялась средствами пакета Matplotlib. Для реализации таблиц и графиков в единой среде код составлен в Web-расширении Jupyter Notebook.

В рамках задания реализована логика работы частотомера, имитирующая базовые функции прибора, в виде модели. Таким образом, разработанный программный продукт удовлетворяет предъявленным требованиям. Его использование позволяет эффективно изучать методы измерения параметров сигналов и принципы работы измерительной аппаратуры.

Литература

1. **А.Г. Сергеев, В.В. Крохин.** Метрология: учебное пособие для вузов. — М: Логос, 2000.
2. **С.И. Герасимов, Е.А. Долгачёва, И.Н. Желбаков, К.А. Иваненко, А.Н. Серов, Д.А. Чумаченко.** Измерение частоты и интервалов времени: практикум — М.: Издательство МЭИ, 2022. — 52 с.
3. **А.Б. Сергиенко** Цифровая обработка сигналов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
4. **SciPy Reference Guide [Электронный ресурс]** / SciPy Community. — <https://docs.scipy.org/doc/scipy/> (дата обращения: 21.11.2025)

А.М. Кужин, студ.; рук. С.И. Герасимов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНЫЙ АССИСТЕНТ В РАСЧЕТЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье рассматривается подход к решению педагогической задачи, связанной с освоением принципов оценки точности измерений [1] в электроэнергетике. Предлагаемая автоматизация расчёта полной погрешности измерительных устройств служит инструментом для устранения трудностей студентов, формализации вычислительных процедур и интерактивного исследования влияния входных параметров на итоговый результат.

Целью работы являлась разработка Desktop-приложения с графическим интерфейсом (GUI) для автоматизации расчёта полной погрешности измерений электрических величин [2]: постоянного и переменного токов и напряжений. Ключевые задачи: выбор типа величины, ввод исходных данных, моделирование приборов, выполнение расчёта результирующей погрешности и автоматическое формирование структурированного отчёта.

Для решения поставленных задач разработано приложение в Python. Программное ядро реализовано на базе следующих библиотек: PyQt используется для работы интерфейса (интерактивных форм), NumPy/SciPy для расчётов составляющих погрешности и их суммирования, PySpice [3] для моделирования цепей, Matplotlib/Pandas для визуализации итоговых результатов. Функционал включает генерацию отчёта в HTML и PDF.

В результате проведённой работы было создано программное обеспечение, которое позволяет: интерактивно выбирать тип измерения и вводить исходные данные в специализированных формах; производить автоматический расчет полной погрешности, разделяя ее на составляющие; отображать эквивалентные схемы измерительных установок для наглядного представления процессов; формировать детализированный отчет.

Разработанный программный продукт удовлетворяет требованиям и прошел апробацию на примерах типовых задач. Его использование в учебном процессе позволяет существенно повысить наглядность и эффективность изучения методов оценки погрешностей электрических измерений.

Литература

1. **Новицкий П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с. : ил. — Текст: электронный.
2. **Шишкин И.Ф.** Теоретическая метрология: учебник для вузов (учебное пособие) / И.Ф. Шишкин. — 4-е изд. — СПб.: Питер, 2010. — 192 с.
3. **PySpice Documentation:** [электронный ресурс] / F. Salvaire. — URL: <https://pyspice.fabrice-salvaire.fr> (дата обращения: 26.11.2025). — Текст: электронный.

В.Е. Мазаник, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ВХОДНОГО ШУМА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА МЕТОДОМ АНАЛИЗА АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

Современные измерительные системы требуют высокой точности преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) является базовым для спектрального анализа благодаря простоте реализации. Ключевым недостатком является влияние эффекта растекания спектра, который возникает из-за некратности периода сигнала и времени измерения, что ведет к погрешностям измерения частоты [1], амплитуды и фазовых значений.

Как известно, для снижения эффекта «растекания спектра» применяют оконные функции эффективно подавляющие ложные (фантомные) гармоники, но приводящие к искажению полезного сигнала, что требует последующего устранения искажений спектра. На практике для уточнения положения максимального спектрального отсчёта — соответствующего значению частоты входного сигнала, — применяют интерполяции по двум или трём спектральным отсчётам [1].

Известно, что основной причиной возникновения погрешности является присутствие во входном сигнале шумов, приводящих к возникновению погрешности определения амплитудных значений спектральных отсчётов, используемых для выполнения расчёта отклонения частоты от частоты наибольшего по амплитуде спектрального отсчёта. Данный эффект является основной причиной ограничения точности данного метода измерения на практике. Целью данной статьи является оценка данной погрешности для случая применения окна Хеннинга и применения двухточечной и трехточечной интерполяций.

Моделирование проводилось в среде Simulink (MATLAB). Была собрана схема, включающая генератор синусоидального сигнала, источник случайного шума и блок БПФ с выбором оконной функции Ханна. Алгоритмы двухточечной и трёхточечной аппроксимации были реализованы в блоке MATLAB Function. Моделирование позволило оценить значение погрешности для двух методов интерполяции и двух типов входного шума: с равномерным и нормальным распределением.

Литература

1. **D. Agrež**, “Non-parametric frequency estimation from DFT coefficients at the same bin using different windows,” 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, TX, USA, 2018, pp. 1–6.

С.А. Подобуев, асп.; рук. А.Н. Серов, д.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ УСРЕДНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА АНАЛИЗА АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

Метод анализа амплитудного спектра является популярным методом измерения частоты сигнала электросети. При использовании данного метода производится расчёт амплитудного спектра входного сигнала посредством применения дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Затем определяется положение максимальной амплитудной компоненты измеряемого сигнала на частотной оси, которая соответствует основной спектральной компоненте сигнала электросети.

Основной причиной возникновения погрешности измерения частоты является эффект растекания спектра. Данный эффект возникает, когда время измерения не кратно периоду входного сигнала. В результате, во временной области на границе интервала наблюдения будет наблюдаться бесконечный скачок, который в частотной области приводит к появлению мнимых спектральных компонент и искажению реальных гармоник.

Одним из способов снижения погрешности измерения является умножение отсчётов входного сигнала на отсчёты оконной функции при расчёте ДПФ, в результате чего удаётся снизить амплитудные значения мнимых спектральных компонент. Для повышения точности измерения возможно применение интерполяционных формул, связывающих отклонение частоты сигнала с отсчётами амплитудного спектра [1]. В рамках данной работы рассмотрено применение формул по двум, трём и пяти отсчётам при применении окна Ханна.

В данной работе проанализирован подход, основанный на разбиении исходного времени измерения на M интервалов измерений. Впоследствии, используя M значений частоты сигнала, определяется среднее значение, которое в итоге принимается за результат измерения частоты. В рамках настоящего исследования рассмотрено разбиение исходного времени наблюдения как на равномерные, так и на неравномерные интервалы. С помощью моделирования в программном пакете Matlab проведена оценка эффективности рассматриваемой методики, а также её сравнение с классическим подходом, при котором частота измеряется за один длительный интервал.

Литература

1. Štremfelj J., Agrež D. Nonparametric estimation of power quantities in the frequency domain using Rife-Vincent windows // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2013. — Т. 62. — №. 8. — С. 2171–2184.

Г.М. Веселов, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ, ОСНОВАННОГО НА АНАЛИЗЕ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

Измерение частоты сети имеет важное значение для всей области электроэнергетики. Существует множество цифровых методов измерения данного параметра во временной и частотной области, которые различным образом характеризуются с точки зрения скорости выполнения измерения и достигаемой точностью. Целью данной работы является исследование метода измерения частоты, основанного на анализе амплитудного спектра. Данный метод заключается в применении оконной функции при выполнении дискретного преобразования Фурье и последующей интерполяции отсчётов амплитудного спектра [1].

Одной из основных причин возникновения погрешности измерения частоты является эффект «растекания спектра», возникающий при несинхронной дискретизации сигнала, когда количество отсчётов за период не является целым. В исследуемом методе для ослабления данного эффекта применяются весовые оконные функции (например, Ханна или прямоугольное окно). Ключевым этапом, позволяющим учесть смещение частоты, является последующая интерполяция двух или трёх наибольших амплитудных коэффициентов ДПФ, расположенных вблизи основной гармоники. Этот подход даёт возможность оценить смещение истинной частоты относительно ближайшей спектральной линии и существенно повысить точность измерения. Также в работе рассматривается альтернативный подход — алгоритм на основе преобразованного ДПФ (TDFT), который направлен на снижение влияния утечки за счёт алгоритмического преобразования соседних отсчётов амплитудного спектра с целью его «сжатия» вокруг истинного положения гармоники [2].

Для сравнительной метрологической оценки классических интерполяционных методов и подхода TDFT была построена имитационная модель в пакете имитационного моделирования MATLAB/Simulink, позволившая исследовать поведение алгоритмов и выявить ключевые факторы, влияющие на точность выполнения измерения.

Литература

1. **D. Agrez**, “Fast measurement of power system frequency in the frequency domain”, XVIII IMEKO World Congress of Metrology for a Sustainable Development, 2006.
2. **Rengang Yang and Hui Xue**, “A Novel Algorithm for Accurate Frequency Measurement Using Transformed Consecutive Points of DFT”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1057–1062, 2008.

Секция 19
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
И ДИАГНОСТИКА
Non-destructive control and diagnostics

Председатель секции: д.т.н., доцент Лунин Валерий Павлович

Секретарь секции: Крылович Анна Андреевна

*М.Е. Дёминова, студ.;
рук. В.П. Лунин, д.т.н., проф. (МЭИ, Москва)*

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ ПО ДАННЫМ ИМПУЛЬСНО-ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

В данной работе представлены результаты исследования, направленного на разработку методики количественной оценки параметров дефектов (глубины и диаметра) с использованием импульсно-вихретокового (ИВТ) контроля и методов математического моделирования.

В ходе исследования была разработана трехмерная конечно-элементная модель в среде COMSOL Multiphysics, имитирующая работу фокусирующего ИВТ преобразователя (рис. 1) на ферромагнитной пластине (сталь K42). В результате численных экспериментов для дефектов диаметром 3...10 мм и глубиной 30...80% толщины материала была получена база данных временных сигналов. Ключевыми информативными параметрами сигнала, чувствительными к изменению геометрии дефекта, были определены амплитуда дифференциального напряжения и время достижения его максимума (рис. 2).

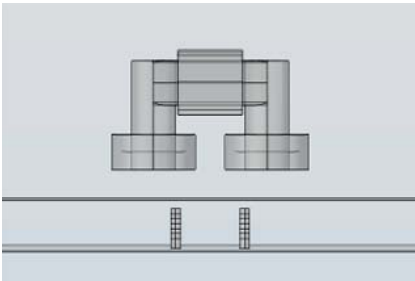


Рис. 1. Трехмерная конечно-элементная модель ИВТ преобразователя с объектом контроля

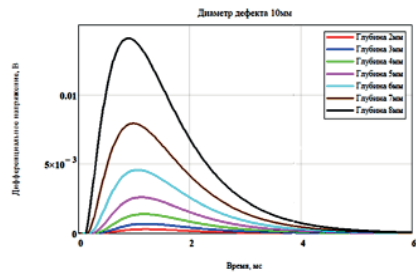


Рис. 2. Временные диаграммы дифференциального напряжения при контроле различных дефекта

Первоначально для решения задачи количественной оценки был применен аппарат множественной линейной регрессии с учетом взаимодействия факторов, при этом были получены регрессионные уравнения вида:

$$\text{Параметр} = \beta_0 + \beta_1 * \text{Время} + \beta_2 * \text{Амплитуда} + \beta_{12} * \text{Время} * \text{Амплитуда},$$

позволяющие по измеренным значениям амплитуды и времени оценивать глубину и диаметр дефекта. Однако при внимательном анализе было выявлено наличие мультиколлинеарности факторов, что ограничивает применения простых линейных моделей и указывает на нелинейный характер зависимости между параметрами сигнала и геометрией дефекта.

*Р.О. Белокопытов, М.Е. Дёмина, студенты;
рук. В.П. Лунин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ИВТ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

При использовании импульсного вихретокового (ИВТ) контроля для определения магнитной проницаемости металлических изделий важным этапом является выделение информативных признаков сигнала, регистрируемого ИВТ преобразователем. Хотя исходные сигналы содержат множество параметров, лишь часть из них обеспечивает стабильную и достоверную оценку магнитных свойств. Отбор таких признаков позволяет точнее оценить магнитную проницаемость и улучшить различие материалов.

Для получения сигналов и последующего выделения информативных параметров была построена и исследована трехмерная конечно-элементная модель ИВТ преобразователя с различными магнитными образцами.

В ходе моделирования были получены графики разностного напряжения во времени для немагнитных и магнитных электропроводящих образцов (рис. 1). На основе графиков напряжения были получены зависимости отношения экстремумов сигналов от магнитной проницаемости образца при различных значениях величины зазора (рис. 2). Эта зависимость позволяет легко различать немагнитные, слабомагнитные и среднемагнитные образцы друг от друга. Также было рассмотрено влияние магнитной проницаемости образца на момент времени пересечения нуля разностным напряжением.

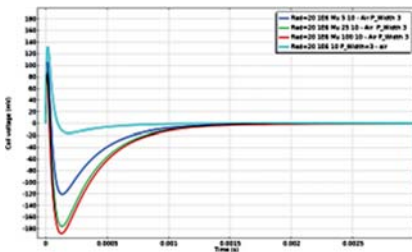


Рис. 1. Графики разностного напряжения

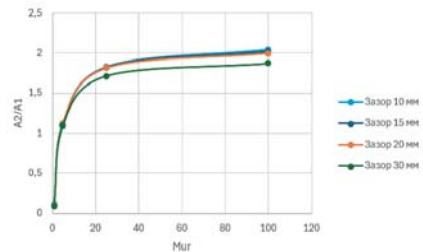


Рис. 2. Зависимости отношения экстремумов от магнитной проницаемости образца

Литература

1. Alcantara JrN.P., Gonçalves JrL. Simulation of an ECT Sensor to inspect the reinforcement of concrete structures.

А.К. Шепелев, студ.; рук. В.П. Лунин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИСПЫТАНИЯ ИВТ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТРУБ

Неразрушающий контроль ферромагнитных трубопроводов, как правило, скрытых под изоляционным покрытием, является критически важной задачей для обеспечения промышленной безопасности. Существующие методы, такие как ультразвуковой или рентгеновский, зачастую требуют прямого доступа к поверхности трубы или являются чрезмерно энергозатратными. Импульсно-вихретоковый (ИВТ) метод, основанный на анализе переходных электромагнитных процессов, лишен этих недостатков и обеспечивает глубокое проникновение поля, что делает его одним из наиболее перспективных для решения данной задачи [1].

Цель настоящего исследования — оценка эффективности импульсно-вихретокового метода для выявления коррозионных повреждений в виде утонения значительных участков стенки ферромагнитных трубопроводов с использованием преобразователя, разработанного на основе конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics.

В работе проведены экспериментальные исследования реализованного электронного устройства на ферромагнитных образцах толщиной 2...10 мм с регистрацией временных характеристик затухающего вихретокового сигнала. В качестве ключевого диагностического параметра выделена скорость затухания сигнала (параметр β), продемонстрировавшая прямую зависимость от толщины материала.

Для повышения точности определения диагностического параметра и стабилизации результатов измерений разработаны и реализованы в среде Python три последовательно усложняющихся алгоритма обработки сигнала: 1) выделение и аппроксимация только основного линейного участка; 2) выделение и аппроксимация двух сопряженных прямых и 3) аппроксимация полного сигнала, разделенного на четыре характерных по форме участка с последующей итеративной оптимизацией параметров соответствующих аппроксимирующих функций. Установлено, что 3-й способ (с аппроксимацией полного сигнала) позволил существенно стабилизировать формируемую градуировочную зависимость, что отразилось в снижении среднеквадратического отклонения результатов в 3...5 раз по сравнению с первыми двумя способами.

Полученные результаты служат основой для создания нового аппаратно-программного комплекса неразрушающего контроля.

Литература

1. **Ulapane N., Alempijevic A., Vidal T.C., Valls J.M.** Pulsed Eddy Current Sensing for Critical Pipe Condition Assessment

К.В. Зотов, аспирант; рук. В.П. Лунин, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Традиционный УЗК сильно зависит от человеческого фактора: квалификации оператора, внимательности, субъективной интерпретации сигналов. Это приводит к вариабельности результатов, пропуску дефектов и высокой стоимости обучения.

Автоматизация УЗК — ключевое направление для повышения объективности, повторяемости, скорости и надежности контроля в таких критических отраслях, как авиастроение, энергетика и строительство.

Создание алгоритмов, способных заменять или значительно дополнять оператора на всех этапах: от управления сканированием до классификации дефектов и формирования заключения является ключевой задачей.

В статье рассмотрены несколько взаимосвязанных этапов:

Алгоритмы обработки и фильтрации сигналов, повышение соотношения сигнал/шум и подавление мешающих факторов. Использование полосовых, режекторных и адаптивных фильтров (Винера, Калмана). Уделено внимание алгоритмам выделения и сегментации дефектов, пороговой обработке по методу Оцу. Проанализированы алгоритмы классификации и идентификации дефектов, определение типа (пористость, трещина, непровар, включение) по его ультразвучным признакам.

Приведены примеры интеграции алгоритмов в системы принятия решений

Автоматизация УЗК на основе современных алгоритмов — это неизбежный тренд, ведущий к созданию полностью автоматизированных систем ультразвукового контроля.

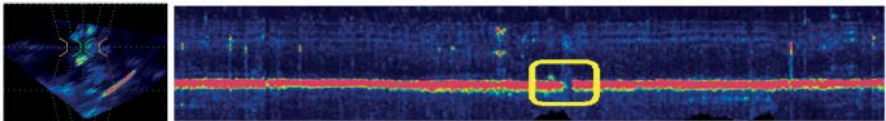


Рис. 1. Контроль качества акустического контакта

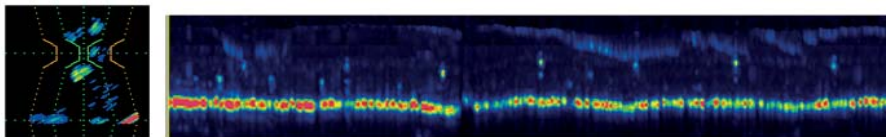


Рис. 2. Определение сигналов от геометрии объекта контроля

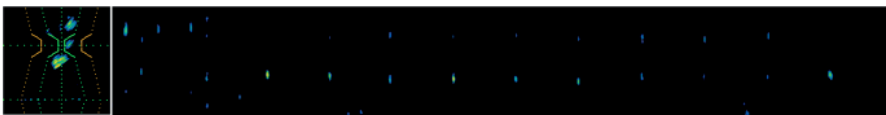


Рис. 3. Определение сигналов от дефектов

*Д.Д. Махотин, студ., К.В. Зотов, аспирант;
рук. В.П. Лунин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ОБЪЕДИНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЫЯВЛЕННЫХ ДЕФЕКТОВ

Современные требования к безопасности и надежности критически важных объектов (авиация, энергетика, магистральные трубопроводы) диктуют необходимость применения высокоточных и достоверных методов неразрушающего контроля (НК).

Цифровая радиография и ультразвуковой контроль являются ведущими методами неразрушающего контроля, каждый из которых имеет свои принципиальные преимущества и ограничения. Автоматический анализ данных только одного метода может приводить к неоднозначной интерпретации дефектов (ложные сигналы, пропуск реальных дефектов, неточная классификация и определение размеров).

Комплексное использование данных цифровой радиографии и ультразвукового контроля позволит преодолеть ограничения каждого метода в отдельности и существенно повысить достоверность и эффективность автоматизированных систем принятия решений.

В статье рассмотрена методология и алгоритмы объединения данных цифровой радиографии и ультразвукового контроля для повышения точности и надежности автоматической идентификации, классификации и оценки размеров дефектов.

Проведён сравнительный анализ возможностей обоих методов в обнаружении различных типов дефектов (пористость, трещины, включения, несплавления и т.д.), разработан алгоритм автоматического пространственного совмещения данных для одного и того же контролируемого объекта, предложена модель синтеза и совместного анализа признаков дефектов, извлеченных из радиографических и ультразвуковых данных, описана оценка эффективности предложенного подхода на экспериментальных данных и сравнение с результатами раздельного анализа.

Приведены экспериментальные данные (рис.1), подтверждающие высокую эффективность объединения результатов цифровой радиографии и ультразвукового контроля, а реализованный алгоритм является значительным шагом в направлении создания полностью автоматизированных интеллектуальных систем неразрушающего контроля нового поколения.

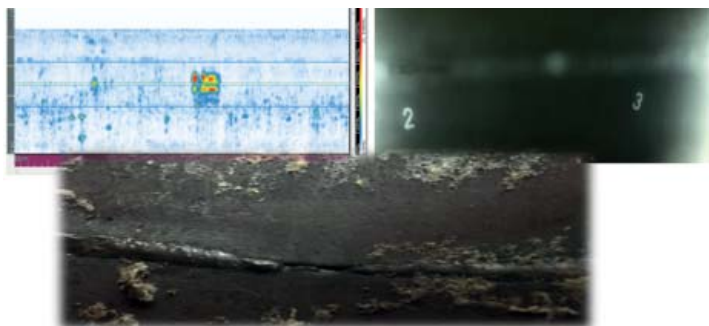


Рис. 1. Объединение результатов цифровой радиографии и ультразвукового контроля

Д.А. Здарова, студ.; рук. А.С. Мачихин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОЛОРИМЕТРИИ И СПЕКТРОСКОПИИ ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛОВ В ЛИСТЬЯХ РАСТЕНИЙ

Концентрация хлорофиллов тесно связана с эффективностью фотосинтеза, что делает их содержание ключевым показателем для прогнозирования урожайности [1]. Традиционный метод на основе экстракции не подходит для полевых оценок ввиду трудоемкости пробоподготовки [2]. Поэтому становятся актуальными методы быстрой оценки содержания пигментов *in vivo* без повреждения ткани. С целью сравнения двух распространенных подходов к такой оценке (колориметрии и спектроскопии отражения) были зарегистрированы спектральные характеристики в диапазоне от 450 до 750 нм листьев различных сортов и видов (*Hibiscus rosa-sinensis*, *Syngonium podophyllum*, *Lactuca sativa*) на разных стадиях роста. Результаты использовали для расчета 10 вегетационных индексов, чувствительных к содержанию хлорофиллов [3], и определения координат цветности в пространстве CIE XYZ. Для получения количественного значения общего содержания хлорофиллов был проведён спектрофотометрический анализ экстрактов образцов. По результатам построенных регрессионных моделей индекс MCARI/OSAVI показал наибольшее значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,92$, среди координат цветности наиболее надежную модель обеспечила координата x с $R^2 = 0,51$. Данное исследование продемонстрировало эффективность спектроскопии отражения в условиях вариации биофизических параметров растений, колориметрия в свою очередь показала меньшую надёжность, что говорит о возможности её применения только для предварительных оценок, где высокая точность не критична.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 25-16-00121).

Литература

1. C.W. Wood. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review // Proceedings of the agronomy society of New Zealand. 1993. V. 23. P. 1–9.
2. J.P. Palta. Leaf chlorophyll content // Remote sensing reviews. 1990. V. 5. №. 1. P. 207–213.
3. A. Zolotukhina. Extraction of chlorophyll concentration maps from AOTF hyperspectral imagery // Frontiers in Environmental Science. 2023. V. 11.

А.А. Золотухина, асп.;
рук. А.С. Мачихин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Спектральные видеосистемы видимого и ближнего инфракрасного диапазона обеспечивают высокопроизводительную оценку состава образцов благодаря анализу спектральных и пространственных характеристик. Применение видеоспектрометрической оценки в задачах сельского хозяйства основано на изменении спектров отражения листьев растений в зависимости от концентрации пигментов в них [1]. Однако результаты значительно подвержены влиянию условий регистрации спектральных изображений и их дальнейшей обработки. Камеры с единовременным захватом спектральных изображений оптимально подходят для полевых условий, поскольку имеют высокую частоту сбора данных, низкие массогабаритные характеристики и небольшой объем регистрируемых данных. С другой стороны, ограниченное количество спектральных каналов может значительно снижать точность восстановления спектров отражения объектов [2], следовательно, оценки содержания пигментов. Целью данной работы является апробация подхода к полевой оценке содержания пигментов на основе данных, зарегистрированных спектральной видеосистемой мультиспектрального типа. Съемка проводилась с высоты 10 м путем закрепления камеры на телескопическом подъемнике. Обработка спектральных изображений включала коррекцию пространственных и спектральных искажений, выбор оптимального спектрального индекса, определение пространственного распределения выбранного индекса и расчет карты содержания пигментов. Разработанные методики регистрации спектральных изображений, калибровки мультиспектральной видеокамеры, обработки и интерпретации пространственно-спектральных данных позволили получить пространственные распределения концентрации хлорофиллов и каротиноидов с относительной ошибкой менее 15%.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 25-16-00121).

Литература

1. **Pu R.** Hyperspectral remote sensing: Fundamentals and practices. CRC, 2017.
2. **Zhou X. et al.** Radiometric calibration of a large-array commodity CMOS multispectral camera for UAV-borne remote sensing // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Elsevier. 2022. V. 112.

*Д.Л. Распутин, асп.; рук. Ю.Л. Жуковский, д.т.н., доц.
(Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург)*

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ИЗ ТОКОВЫХ СИГНАЛОВ

Разработка эффективных программно-аппаратных комплексов неразрушающего контроля асинхронных двигателей (АД) требует перехода от традиционного спектрального анализа к методам, чувствительным к нестационарным процессам [1]. Традиционный подход быстрого преобразования Фурье зачастую демонстрирует недостаточную селективность при раннем обнаружении дефектов. Целью работы является обоснование методики автоматизированного формирования набора информативных признаков, необходимых для обучения интеллектуальных систем диагностики.

В ходе исследования рассмотрен алгоритм обработки временных рядов тока статора АД. Предложенный подход базируется на последовательной фазовой синхронизации сигналов и выделении информативных компонент. Последовательность этапов преобразования экспериментальных данных в набор диагностических признаков представлена на рисунке 1. В качестве математической основы исследована эффективность применения адаптивных алгоритмов разложения сигнала, в частности эмпирическая модовая декомпозиция (EMD) и сингулярно-спектральный анализ (SSA).

Апробация на экспериментальных данных показала, что применение выбранных алгоритмов позволяет выявлять зависимости, коррелирующие с дефектами подшипниковых узлов. Применение алгоритма SSA позволило зафиксировать эффект миграции групп сингулярных компонент. Полученные результаты свидетельствуют о высокой информативности формируемых признаков, что обеспечивает качество обучающих выборок для моделей машинного обучения в задачах технической диагностики.

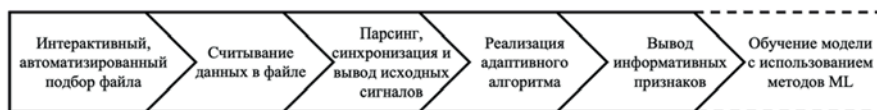


Рис. 1. Последовательность этапов обработки экспериментальных данных и формирования признакового пространства

Литература

1. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current // *Energies*. — 2023. — Т. 16. — № 8. — 3303. — DOI: 10.3390/en160833.

А.А. Горбунова, асп.; рук. Е.Г. Базулин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБЛАСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПО ЦФА-ИЗОБРАЖЕНИЯМ

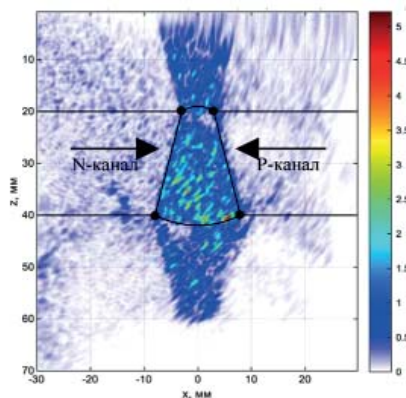


Рис. 1. Исходное ЦФА-изображение ОНМ

изображения. Для этого использовались построный поиск первого ненулевого значения и ранговые непараметрические методы (У-критерий Манна – Уитни, Стьюдента). Для повышения эффективности их работы применялась предобработка ЦФА-изображения: выравнивание гистограммы, анизотропная диффузия, кластеризация Fuzzy C-means и пороговая сегментация по методу Отсу [1]. Анализ выполнялся по отражённому от дна лучу, поскольку на нём лучше видна вся граница ОНМ. На рис. 1 показано ЦФА-изображение, полученное по эхосигналам, рассчитанным в программе CIVA [2] по N-каналу для образца толщиной 20 мм. Линиями чёрного цвета показаны контуры образца и ОНМ. Относительная ошибка определения координат узловых точек (показаны на рис. 1 кругами) ОНМ представлена в табл. 1.

Таблица 1. Относительная ошибка, %

Метод	Ненулевой элемент		Манн-Уитни		Критерий Стьюдента	
Z, мм	0	20	0	20	0	20
N-канал	2,9	3,5	2	6	3	3,4
P-канал	5	4,3	24	13	18	0,6

Численные эксперименты показали, что метод поиска ненулевого элемента оказался самым точным (табл. 1). Среднюю относительную ошибку определения координат узловых точек ОНМ можно оценить как 4,3%.

Литература

1. Haralick R.M., Shanmugam K. Textural Features for Image Classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973.
2. EXTENDE сайт. URL: <https://www.extende.com/ndt> (дата обращения 13.11.2025).

Направление III
БЕЗОПАСНОСТЬ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
Security and information technology

Руководитель направления:

Директор инженерно-экономического
института НИУ «МЭИ»

к.т.н., доцент

Невский Александр Юрьевич

Секция 20
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
Information security

Председатель секции: д.т.н., профессор Минзов Анатолий Степанович

Секретарь секции: Агуреев Иван Александрович

Е.А. Лыкова, студ.; рук. А.С. Минзов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ZERO TRUST ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОММЕРЧЕСКОЙ ТАЙНЫ

В современной экономике коммерческая тайна представляет собой не просто конфиденциальные данные, а ключевую инновационную идею, формирующую конкурентное преимущество компании. К объектам коммерческой тайны относятся инновационные идеи, ноу-хау, производственные технологии и рецептуры, уникальные штаммы, а также организационные и управленческие методики. Особую ценность сегодня представляют алгоритмы обработки больших данных (BigData) и модели искусственного интеллекта.

Основные риски разглашения связаны с действиями персонала, утратой материальных и электронных носителей информации, а также недостаточной защитой технологических процессов. В этих условиях традиционные периметровые модели безопасности демонстрируют неэффективность, а потому требуется переход к более строгим и адаптивным подходам, таким как концепция Zero Trust, основанная на принципе «нулевого доверия».

Ключевой целью внедрения Zero Trust является создание целостной системы, обеспечивающей защиту коммерческой тайны на всех этапах ее жизненного цикла. На этапе создания проводится моделирование сценариев потенциального разглашения, на основе которых разрабатываются и внедряются превентивные меры. На этапе проектирования реализуется микросегментация. На этапе внедрения применяется метод наименьших привилегий, что минимизирует риски внутренних угроз. На этапе эксплуатации обязательна непрерывная верификация подлинности пользователей и их устройств на протяжении всей сессии работы с данными. На этапе вывода из эксплуатации обеспечивается контроль над процессом уничтожения или архивирования носителей информации.

Таким образом, построение системы защиты на принципах Zero Trust обеспечивает целостный и адаптивный подход к безопасности коммерческой тайны. Данная концепция позволяет не только противодействовать современным киберугрозам, но и эффективно управлять рисками на протяжении всего жизненного цикла инновационного актива.

Литература

1. Минзов А.С., Невский А.Ю., Минзов С.А. Совершенствование системы защиты коммерческой тайны: принципы, классификация, методы и технологии // Вопросы кибербезопасности № 5 (69) — 2025 г. стр. 2–13.

Ю.С. Лохоткин, студ.; рук. Н.О. Стрелков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОРМАТА CTF-СОРЕВНОВАНИЙ «OS MASTERY»

Развитие практических методов обучения специалистов в сфере информационной безопасности является актуальной задачей, учитывая постоянно возрастающие требования к подготовке кадров и рост числа киберугроз. В настоящее время популярность набирают соревнования CTF, позволяющие реализовать практическое обучение будущих специалистов в ходе их теоретического обучения. Традиционные форматы соревнований CTF — Jeopardy и Attack-Defense — применяются достаточно широко, однако имеют ограничения. Первый из них ориентирован на выполнение отдельных заданий различной сложности и эффективен для начального уровня подготовки, но не формирует у участников целостного понимания логики атак. Второй требует высокого уровня знаний, что делает его доступным лишь для подготовленных специалистов. Таким образом, между форматами возникает разрыв, затрудняющий постепенное развитие навыков участников, что определяет необходимость поиска новых решений.

В рамках исследования предлагается разработка принципиально нового формата проведения CTF-соревнований под названием OS Mastery. Его концепция основана на построении заданий, объединённых в логически связанные цепочки по модели MITRE ATT&CK [1], что позволяет приблизить сценарий к условиям реальных кибератак. Динамические изменения в ходе выполнения заданий создаёт дополнительную вариативность и формирует у участников опыт работы в условиях, максимально приближённых к практической деятельности. Такой подход сочетает преимущества существующих форматов и обеспечивает плавный переход от базового уровня подготовки к профессиональной компетенции.

Таким образом, в процессе исследования планируется формализация разрабатываемого формата, проектирование и реализация платформы проведения CTF и разработка сценария для него. Совместно с основным результатом должен быть подготовлен комплекс заданий, сопроводительной документации и описаний.

Полученные результаты могут быть использованы в образовательных программах для формирования практических навыков работы с операционными системами и инструментами информационной безопасности на примере, приближенном к реальным атакам, в рамках подготовки специалистов в сфере информационной безопасности.

Литература

1. **B. Strom, A. Applebaum, D. Miller.** MITRE ATT&CK: Design and Philosophy. — McLean, VA: The MITRE Corporation, 2020.

Д.С. Крысин, студ.; рук. О.Р. Баронов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛИТИК БЕЗОПАСНОСТИ В DLP-СИСТЕМАХ

Эффективность DLP-систем на практике часто не соответствует их технологическим возможностям. Причина этого разрыва кроется в бессистемной разработке политик безопасности: правила создаются без учета специфики организации, что порождает множество ложных срабатываний и вступает в конфликт с бизнес-процессами [1]. Такая ситуация ставит задачу перехода от интуитивной настройки к формализованному инженерному подходу.

Предлагаемая методика решает эту научно-техническую проблему, преобразуя процесс формирования политик в управляемый инженерный цикл. Его результатом становится адаптивная, верифицируемая и надежная система защиты. Методика строится из пяти взаимосвязанных компонентов, начиная с аналитического этапа, на котором классифицируются и систематизируются все значимые факторы внешней и внутренней среды организации.

В основе методики лежат ее архитектура и принципы. Они вводят формальную модель политики в виде кортежа, ролевую модель для защиты самих правил и концепцию управляемого жизненного цикла. Ключевой компонент — метод синтеза и верификации. Он позволяет конструировать политики на основе бизнес-требований и, что важнее, проводить их формальный анализ на полноту и непротиворечивость еще до внедрения. Такой предварительный анализ сводит к минимуму риск операционных ошибок.

Практическое применение методики обеспечивается набором алгоритмов. Они детально описывают все стадии жизненного цикла политики: от проектирования и калибровки до оптимизации и вывода из эксплуатации. Для объективной оценки предложена многоуровневая система метрик, измеряющая как эффективность предотвращения утечек, так и операционную надежность самих политик.

В итоге предложенная методика — это не набор общих рекомендаций, а системный инструментарий. Он дает организациям возможность выстроить прогнозируемую и надежную защиту от утечек данных, адаптированную к их уникальным условиям и раскрывающую весь потенциал современных DLP-технологий.

Литература

1. **DLP Policies: A Comprehensive Guide** // SearchInform. — URL: <https://searchinform.com/articles/cybersecurity/measures/dlp/essentials/policies/> (дата обращения: 20.09.2025). — Текст: электронный.

А.И. Шпагин, студ.;
рук. А.С. Минзов, д.т.н., профессор (НИУ «МЭИ»)

ИНТЕГРАЦИЯ КИБЕРПОЛИГОНА AMPIRE В ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ПРОГРАММУ БАКАЛАВРИАТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ 10.03.01 «ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

Растущая угроза целевых компьютерных атак требует от специалистов по информационной безопасности не только теоретических знаний, но и практических навыков противодействия. Ключевым элементом подготовки становится не только понимание современных способов и методов защиты от атак, но и понимание мышления и действий злоумышленников. Одним из методов обучения таким навыкам является освоение принципов этичного хакинга. Для такого обучения может использоваться виртуальная, изолированная среда, которая имеется на киберполигоне Ampire от компании АО «Перспективный мониторинг» в режиме «Red Team».

Целью работы является интеграция киберполигона Ampire в образовательную программу бакалавриата по направлению подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность» с применением шаблона «Red Team» [1]. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи: провести анализ применимости киберполигонов в обучении специалистов по информационной безопасности и требований профессиональных стандартов [2], разработать учебно-методический комплекс новой дисциплины на основе шаблона «Red Team» киберполигона Ampire, включая учебный план, программу дисциплины и практические сценарии, организовать учебный процесс с системой оценивания.

В результате планируется создание полноценной учебной дисциплины, интегрированной в образовательный процесс. Это будет достигнуто за счет детального проектирования всех элементов курса — от разработки учебного плана до конкретных лабораторных работ и методических материалов. Практические занятия на платформе Ampire позволят студентам бакалавриата получить уникальный опыт моделирования атак и отработки навыков противодействия им, что напрямую соответствует задачам, определенным в профессиональных и образовательных стандартах.

Литература

1. **Основные профессиональные образовательные программы 2025 НИУ «МЭИ»** [Электронный ресурс]. — URL: <https://mpei.ru/sveden/education/Pages/opop2025.aspx> (дата обращения: 28.09.2025).
2. **Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 14.09.2022 г. №533н** об утверждении профессионального стандарта «Специалист по безопасности компьютерных систем и сетей» [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/352000917> (дата обращения: 28.09.2025).

Д.С. Годовицина, студ.; рук. А.С. Минзов, проф. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУММАРНОГО УЩЕРБА ОТ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Используемый в настоящее время подход к управлению рисками информационной безопасности (ИБ) обладает высокой степенью субъективизма и приводит к значительной вариативности в результатах, так как основывается на экспертной оценке параметров риска [1]. Такая технология дает лишь относительное понимание его величины. Следствием этого является невозможность объективного сравнения рисков, что может привести к неэффективному распределению ресурсов для их обработки. В результате, существующая практика не позволяет точно оценить суммарный ущерб и определить его границы, что лимитирует возможность разработки достоверных и обоснованных стратегий обеспечения безопасности, а также не учитывает разные условия информационной определенности параметров риска.

Метод имитационного моделирования может быть применен для определения доверительного интервала значений суммарного риска с заданной вероятностью. При этом значение каждого риска определено лингвистической переменной, которая задается в виде нескольких термов: x_1 , x_2 и x_3 . Термы задаются интервалами числовых значений. Имитационная модель позволяет вычислить среднее значение суммы рисков при случайных значениях каждого риска в заданных интервалах. Модель имеет следующий вид:

$$S_u = \sum_{i=1}^n \tilde{U}_i, \text{ где } \tilde{U}_i = f(M_i, \Delta_i) \text{ при } M_i \in \Delta_j;$$

$$\Delta = \{\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_k\}$$

Тогда, например, для значения $M_i = \text{«высокий»}$ $\Delta_j = \text{Rnd}(1000;10000)$.

В результате моделирования определены границы доверительного интервала при вероятности 0,95 ($\pm 28\%$) для системы с 20 рисками при проведении 500 прогонов. На рисунке 1 приведена гистограмма распределения отклонений значений суммарного риска, а также выделены границы доверительного интервала.

Функция распределения является нормальной, то есть большинство значений сосредоточено около среднего. Таким образом, метод имитационного моделирования можно использовать для вычисления суммарных значений ущерба.

В связи с этим целью работы является разработка методики управления рисками ИБ на основе применения имитационного моделирования, направленной на снижение субъективности результатов оценки рисков.

Результаты исследования могут быть использованы для автоматизации процесса оценки рисков ИБ и определения суммарного ущерба от их реализации.

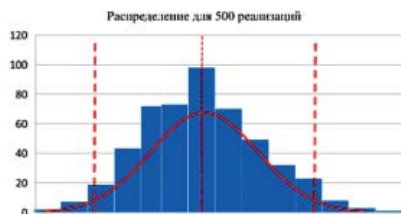


Рис. 1. Распределение отклонений значений суммарного риска

Литература

1. Sérgio Nunes. Information Security Risk Management: A Systematic Literature Review // Journal of Information Systems Security — 2019. — № 3. — с. 161–184.

А.Э. Комаров, студент, рук. С.В. Попов, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ АТАК С ПОМОЩЬЮ SOC

Актуальность исследования связана с ростом количества целевых атак (АРТ), представляющих серьезную угрозу для информационной безопасности организаций. Целевые атаки — это сложные, многоступенчатые киберугрозы, организованные злоумышленниками с большими ресурсами и целью достижения долгосрочной скрытной компрометации информационных систем [1]. Как правило, такие атаки используют целенаправленные тактики и технологии, что отличает их от массовых вредоносных кампаний.

Ключевыми признаками целевых атак являются длительный скрытный режим работы, низкая заметность для распространенных методов обнаружения и использование специализированных техник обхода защиты. Такие атаки часто проявляются через сложные цепочки событий, включающие многослойные внедрения и командно-контрольные каналы, что осложняет их обнаружение и устранение [1].

Практическая сложность обнаружения АРТ обусловлена отсутствием универсальных сигнатур, высокой вероятностью ложных срабатываний при использовании методов анализа аномалий, а также необходимостью постоянного обновления правил и моделей, что требует больших затрат времени и ресурсов. В связи с этим, традиционные средства защиты, такие как системы обнаружения вторжений или антивирусные программы, демонстрируют низкую эффективность против целевых атак.

В связи с этим целью работы является разработка метода выявления целевых атак с применением методов анализа поведения и корреляции событий в системе SOC. Предлагаемый подход включает внедрение новых алгоритмов анализа данных, позволяющих более точно отличать целевые атаки от обычных инцидентов и снижать количество ложных срабатываний. Такой подход позволяет повысить надежность и оперативность обнаружения угроз в условиях увеличения объемов данных и сложности атакующих техник.

Разработанная методика основывается на сочетании эвристических правил, анализа цепочек событий и машинного обучения, что дает возможность выявлять тонкие признаки целевых атак без необходимости использования специфических сигнатур. Это существенно повышает адаптивность системы и повышает уровень защиты информационных ресурсов организаций. Итогом работы является создание методики, которая может быть внедрена в действующие SOC организаций для повышения их уровня защиты.

Литература

1. **Tatam M. et al.** A review of threat modelling approaches for APT-style attacks 2021. [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021000748>

А.Р. Омаров, студ.; рук. А.С. Минзов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РЕАЛИЗАЦИИ УГРОЗ КОММЕРЧЕСКОЙ ТАЙНЫ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Сравнительный анализ отечественных и зарубежных концепций по защите коммерческой тайны (КТ) выявил закономерность: КТ рассматривается как уже готовое решение [1]. КТ не создаётся мгновенно (рис.1), поэтому моделировать сценарии реализации угроз и принимать меры защиты необходимо не только на этапе эксплуатации, но и на всех этапах жизненного цикла КТ. КТ в исследовании рассматривается как инновационная идея, которая существует в двух формах: информация и технология.



Рис. 1. Полный цикл управления системой защиты КТ

Концепция ZeroTrust (ZT) позволяет постоянно контролировать достоверность источников информации, всех субъектов и объектов доступа и моделировать сценарии реализации угроз КТ в информационных системах на всех этапах жизненного цикла КТ.

Отсюда целью работы является моделирование сценариев угроз КТ в информационных системах на всех этапах жизненного цикла КТ.

Планируемые результаты исследования позволяют моделировать сценарии реализации угроз КТ и принимать меры защиты КТ в информационных системах на всем жизненном цикле КТ с использованием концепции ZeroTrust.

Литература

1. Минзов А.С., Невский А.Ю., Минзов С.А. Совершенствование системы защиты коммерческой тайны: принципы, классификация, методы и технологии // Вопросы кибербезопасности. — 2025. — №. 5.

*Д.Д. Яковенков, студ.;
рук. А.Ю. Невский, доцент, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ ДОВЕРИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Существующее противоречие между нормативными требованиями к высоким уровням доверия и отсутствием практических механизмов их доказательства создает серьезную проблему оценки безопасности, усугубляемую динамичностью современных информационных систем.

Для решения указанной проблемы в рамках исследований, разрабатывается универсальная модель доказательства доверия, основанная на интеграции двух комплементарных методологических подходов. С одной стороны, формальный метод Event-B, обеспечивающий строгую математическую верификацию инвариантов безопасности, а с другой стороны, архитектурный подход Zero Trust, реализуемый через сценарный компонент модели. При этом условиями доверия выступают системное методологическое и технологическое обеспечение соответствия функциональным требованиям безопасности, а также наличие целостного механизма верификации, сохраняющего свою эффективность при изменениях архитектуры на протяжении всего её жизненного цикла

Поэтому интеграция этих подходов в единую гибридную модель представляет собой ключевую научную новизну исследования. Процесс создания модели включает разработку формализованной методики преобразования текстовых требований стандартов безопасности в формальные инварианты и проверочные сценарии. Будет создана алгоритмизированная процедура сопряжения компонентов, которая позволит совместить строгость формальной верификации с полнотой логического анализа. Особое внимание будет уделено разработке механизма взаимной верификации результатов.

Апробация модели проводится на репрезентативном примере, где демонстрируется процедура преобразования требований [1] в элементы модели. Разработанная модель должна обладать свойствами полноты, верифицируемости, адаптивности и практической применимости, что откроет возможности для ее внедрения в процессы оценки соответствия уровню доверия при разработке защищенных информационных систем.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013 «Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Компоненты доверия к безопасности».
2. Хорошилов А.В., Щепетков И.В. ADV_SPM — Формальные модели политики безопасности на практике. Труды ИСП РАН, том 29, вып. 3, 2027 г.

*П.А. Радзиевский, студент;
рук. А.Ю. Невский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ДОВЕРИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА ОЦЕНКИ ПО УД-4

Применение различных ИТ-продуктов, средств обработки и защиты информации, соответствующих определенным требованиям безопасности, является важным аспектом защиты информации. Одним из вариантов подтверждения соответствия продукта требованиям безопасности информации является проведение оценки доверия по методике, определенной нормативными документами ФСТЭК России (сертификация) [1].

При проведении оценки доверия по УД-4 на основе приказа ФСТЭК России № 76 необходимо выполнить ряд мероприятий, включающих проектирование архитектуры безопасности системы (средства), разработку документации, разработку модели угроз и проведение формальной (математической) системы доказательства о том, что существующая система не содержит уязвимостей для решения задач с конфиденциальной информацией [2]. При проведении доказательства применяются инструменты и специализированные языки (например, Event-B, AstraVer Toolset), которые не сертифицированы ФСТЭК России и которые не создают достаточную убедительную систему доказательств доверия. Отсюда целью работы является представление методического обеспечения оценки уровня доверия к безопасности объекта оценки по УД-4. Итогом работы станет создание комплексного подхода к оценке четвертого уровня доверия, сочетающего математическое моделирование с учетом неопределенности и детализированное методическое обеспечение проведения оценки. В работе будет проведен анализ принципов оценки доверия в соответствии с международными стандартами и приказом ФСТЭК № 76, будет разработана формализация требований к четвертому уровню доверия и будет сформирована математическая модель объекта оценки. Также планируется создание модели процесса оценки с применением теории нечетких множеств для учета неопределенности экспертных суждений и неполноты исходных данных.

Литература

1. Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий (выписка) (утв. приказом ФСТЭК России от 2 июня 2020 г. № 76);
2. **Хорошилов А.В., Щепетков И.В.** Adv_spm — формальные модели политики безопасности на практике URL: <https://clck.ru/3EzriN>.

*А.Н. Перелыгин, студ.;
рук. С.С. Рыжиков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ ЧЕРЕЗ ПОБОЧНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

Существуют технические каналы утечки информации (ТКУИ), которые могут использоваться для взаимодействия вредоносного ПО с нарушителем безопасности при организации атаки, которая не обнаруживается средствами контроля и защиты. Одним из способов реализации утечки информации по акустическому каналу может являться управление скоростью вращения вентилятора компьютера, за счет которого изменяется частота и амплитуда звука практически незаметная для человеческого слуха, но регистрируемая чувствительными микрофонами.

Использование методов машинного обучения для обнаружения утечек информации через ТКУИ представляет собой актуальную задачу, направленную на выявление и предотвращение угроз, связанных с несанкционированным доступом к информации [1].

Целью исследования является разработка методики, основанной на методах машинного обучения, для обнаружения возможной утечки информации через акустический канал, сформированный путем управления скоростью вращения вентиляторов системы охлаждения. Основной задачей является проверка гипотезы о возможности применения метода машинного обучения, для выявления аномалий, которые могут быть сигналом о возможной утечки информации.

Для регистрации сигналов предполагается использование высокочувствительного микрофона. Первоначальным этапом будет сбор эталонных акустических спектров при различных условиях функционирования оборудования и фоновой обстановки. За эталон, который будет использоваться в качестве модели для обучения, берётся спектр, разделенный на интервалы частот.

Планируемым результатом является создание модели, способной выявлять сигналы побочных каналов в условиях реального времени. Разработанная методика будет способствовать повышению уровня защиты информации в системах обработки данных за счёт внедрения средств автоматического мониторинга, основанных на алгоритмах машинного обучения.

Литература

1. **Дротенко А.А., Евстифеев А.А., Бонч-Бруевич А.М.** Использование нейросетевых алгоритмов при проведении специальных исследований. М.: Сборник материалов XVII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы — 2023.

Д.С. Сланчев, студ.; рук. И.А. Агуреев, ст. препод. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ MITRE ATT&CK ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАЗВЕДКИ УГРОЗ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Ключевой проблемой современной киберразведки является оперативное преобразование данных о ТТР (тактиках, техниках и процедурах) в практические механизмы защиты. База знаний MITRE ATT&CK служит основным источником структурированных данных о ТТР [1], однако отсутствие методики ее исследования затрудняет практическое применение.

Целью работы является разработка методики исследования MITRE ATT&CK для повышения эффективности разведки угроз. Методика должна обеспечить преобразование теоретических данных ТТР в правила корреляции SIEM и сценарии реагирования.

Для решения данной цели планируется провести анализ современных подходов к классификации ТТР, разработать модель преобразования техник ATT&CK в правила обнаружения, апробировать методику на примерах реальных атак АРТ-групп.

Научная гипотеза исследования основана на предположении, что структурированное исследование взаимосвязей между тактиками ATT&CK и уязвимостями корпоративной инфраструктуры позволит сократить время реагирования на угрозы.

Планируемым результатом исследования являются формализованная процедура сопоставления ТТР с векторами атак, набор практических инструментов для проактивной защиты, критерии оценки эффективности методики.

Практическая значимость работы определяется возможностью интеграции разработанной методики в процессы безопасности корпоративных систем для решения проблем обработки большого объема разведанных и сложности интерпретации ТТР.

Основные направления работы охватывают анализ потенциальных векторов атак через базу знаний MITRE ATT&CK, выявление уязвимых мест инфраструктуры, разработку сценариев проактивного противодействия угрозам.

Литература

1. **Mauro Conti, Ali Dehghantanha, and Tooska Dargahi** Cyberthreat Intelligence: Challenges and Opportunities // Cyber Threat Intelligence. 2018.

Е.Д. Логинов, студ.; рук. О.Р. Баронов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ DECEPTION-ПЛАТФОРМ

Современные информационные системы подвергаются многоэтапным и целевым атакам, при которых злоумышленники используют методы разведки, перемещения внутри сети, сокрытия следов присутствия и другие. Перспективным направлением повышения защищённости информационных систем являются технологии проактивной защиты, в частности Deception-платформы. Отмечается, что наибольшую эффективность демонстрируют Deception-платформы, совмещающие элементы имитации сервисов, ложных учётных данных и модифицируемых ловушек [1].

Несмотря на зрелость технологий Deception, остаётся недостаточно проработанным вопрос скрытности их применения. Чем менее заметны ловушки и вспомогательные элементы Deception, тем выше вероятность взаимодействия с ними нарушителя и тем больше информации удаётся собрать о его тактике.

Цель исследования — разработка практических методов повышения скрытности ловушек в информационных системах при использовании Deception-платформ.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать применяемые в современных Deception-решениях подходы к маскировке ловушек; выявить архитектурные особенности информационных систем, влияющие на обнаружимость имитационных объектов; сформировать набор методов сокрытия ловушек, реализуемых средствами операционных систем и функционалом Deception-платформ; разработать рекомендации по их применению в сетях с зональной сегментацией.

Результат исследования выражается в создании набора методов скрытного размещения приманок и ловушек Deception. Предложенные методы включают управление сетевыми атрибутами и службами на уровне ОС, адаптивное распределение имитационных объектов в инфраструктуре, корректировку поведенческих характеристик ловушек под типовые профили узлов, настройку прав доступа и способов публикации фальшивых учётных данных.

Литература

1. **Современные системы киберобмана: от статичных ловушек до гибких платформ с широкими возможностями** [Электронный ресурс]. — URL: <https://xello.ru/content-hub/q9hedi95djzrjcnhc5fg5an3> (дата обращения: 16.11.2025)

А.В. Ольховик, студ.; рук. А.С. Минзов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТА ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 2021 ГОДА ПРИ СОЗДАНИИ И УПРАВЛЕНИИ СМИБ

Появление нового стандарта в 2021 году выявило необходимость в сравнении его с предшественником. В результате сравнительного анализа было выявлено, что подход к созданию и управлению СМИБ по ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 2021 года (далее — Стандарт) отличается от ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 2006 года. Базовая логика цикла PDCA Деминга–Шухарта сохраняется, но в редакции 2021 года сделан акцент на непрерывном совершенствовании (п. 10.2) и риск-ориентированном планировании по аналогии с принципами ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство». Разделы 4–10 соответствуют HLS (High-Level Structure). Контекст и заинтересованные стороны (4.1–4.3) задают критерии риска (6.1.2); по ним выбираются и обосновываются меры из Приложения А с оформлением SoA (Service-Oriented Architecture). Далее осуществляется реализация мероприятий по управлению рисками и их пересмотр (8.1–8.3). Полученные результаты измеряются, проверяются и анализируются в рамках мониторинга (9.1–9.3), после чего несоответствия устраняются, а система целенаправленно улучшается (10.1–10.2). Такой механизм обеспечивает подстройку СМИБ к изменениям внешней и внутренней среды и согласование с бизнес-стратегией организации, превращая модель управления СМИБ в эволюционную. Однако, для этого требуется разработка документации, регламентирующей управление ИБ.

Новизна исследования заключается в разработке адаптивной системы управления рисками и возможностями, обеспечивающей эволюционный переход от линейной PDCA-модели к динамическому управлению процессами СМИБ в соответствии с требованиями Стандарта.

Целью является разработка методического руководства с пакетом документов СМИБ, включающего политику ИБ; отчет о применимости; план обработки рисков; процедуру планирования и контроля; инструкцию для проведения внутренних аудитов; форму анализа со стороны руководства и других документов.

Разрабатываемая методика обеспечит системный переход организаций к требованиям Стандарта, формируя согласованную архитектуру процессов и документов СМИБ, основанную на принципах риск-ориентированного управления и непрерывного совершенствования.

Литература

1. Ali M.T. Evaluation of ISO/IEC 27001 Framework Implementation for Information Security in Organizations: A Systematic Literature Review.

Д.А. Румянцев, студ.; рук. А.О. Горбенко, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ В СФЕРЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Современные организации функционируют в условиях постоянного роста цифровых угроз, что делает актуальной задачу системного формирования документационного обеспечения информационной безопасности. Отсутствие единой модели документооборота приводит к дублированию требований и несогласованности действий.

Целью работы является разработка методики формирования документов, включающей алгоритм последовательности их создания на основе иерархической модели, где каждый нижестоящий уровень детализирует и реализует требования более высоких уровней, обеспечивая полную реализацию политики в организации. Предложена четкая четырехуровневая структура:



Рис. 1. Иерархия нормативных документов ИБ

1. Уровень 1: Стратегический уровень — определяет требования ИБ.
2. Уровень 2: Тактический уровень — разрабатывает политику для процессов и технологий.
3. Уровень 3: Операционный уровень — руководства для сотрудников.
4. Уровень 4: Уровень мониторинга и контроля — фиксация результатов.

Научная новизна работы заключается в формализации правил наследования документов между уровнями и создании системы критериев для адаптации типового набора под отраслевые требования.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения разработанной методики для систематизации процессов документирования. Подход позволяет сформировать базовый пакет документов с учетом отраслевой специфики, требований ФСТЭК и ФСБ, а также обеспечивает непротиворечивость документной базы и снижает трудозатраты на её создание за счет последовательной детализации требований.

Литература

1. Колесниченко-Янушев, С.Л. Методические основы обеспечения документации в области стандартизации и безопасности информации на промышленных предприятиях / С.Л. Колесниченко-Янушев, Н.С. Ключарева, Е.Е. Абушова, Д.С. Емельянова // Вестник Санкт-Петербургского государственного технологического университета. — 2022. — № 35. — С. 54–59.

И.А. Дьяченко, студ.;

рук. А.С. Минзов, д.т.н., профессор (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В SIEM ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Современные центры мониторинга информационной безопасности работают с постоянно растущими объемами событий, поступающих от серверов, сетевого оборудования, рабочих станций, сервисов и приложений.

В условиях развития угроз и усложнения инфраструктур особую актуальность приобретает применение методов машинного обучения для автоматического выявления аномального поведения и раннего обнаружения инцидентов.

В качестве предметной области выбраны события сетевого оборудования (меж-сетевые экраны, маршрутизаторы, коммутаторы), так как именно они формируют значительную долю потока событий и отражают ключевые сетевые аномалии.

Использование ML-детектирования дополняет классические корреляционные механизмы SIEM, снижая долю ложных инцидентов и повышая чувствительность к сложным многошаговым атакам.

Интеграция моделей машинного обучения в контур SIEM предполагает построение полноценного конвейера: сбор и нормализация событий, формирование признаков, обучение и валидация моделей, онлайн-инференс с низкой задержкой и генерация обогащённых инцидентов.

Эффективность предлагаемого подхода предполагается оценивать в сравнении с существующей практикой, включающей, с одной стороны, ручную регистрацию инцидентов аналитиками на основе стандартных представлений событий SIEM без использования ML-подсказок, а с другой — опору исключительно на статические корреляционные правила SIEM.

Результатом исследования является разработка и апробация прототипа ML-подхода к выявлению аномалий в событиях сетевого оборудования и рекомендации параметров для регистрации инцидентов ИБ в SIEM, а также формирование практических рекомендаций по его интеграции в центры мониторинга для повышения эффективности обнаружения угроз и снижения нагрузки на аналитиков.

Литература

1. Куанг, Й.Н., Мустафа, Н., Ситникова, Э., Чу, К.-К.Р. Критический обзор подходов машинного обучения и искусственного интеллекта в кибербезопасности // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 106151–106174. — DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3201558.

Н.М. Патрина, студ.; рук. О.Р. Баронов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ УЯЗВИМОСТЯМИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Современные информационные системы сталкиваются с постоянно растущим числом киберугроз, при этом традиционные подходы к управлению уязвимостями оказываются недостаточно эффективными против скрытых уязвимостей. На основании существующего Руководства ФСТЭК России по организации процесса управления уязвимостями все современные системы управления уязвимостями построены на том, чтобы определить критичность известных уязвимостей, а затем устранить их за определённое время [1]. Однако данное Руководство не определяет процесс управления скрытыми уязвимостями.

Прогнозирование атак на информационные системы с использованием неизвестных уязвимостей может быть реализовано через анализ целей и мотивов потенциальных злоумышленников. Такой анализ помогает понять, какие именно активы могут стать целью злоумышленников. Основная идея заключается в том, что злоумышленники стремятся получить доступ к наиболее ценным или уязвимым частям системы. Выявление этих целей позволяет сосредоточить усилия на защите именно тех активов, которые с наибольшей вероятностью будут подвержены атаке.

Для прогнозирования атак с использованием неизвестных уязвимостей можно использовать модели на основе ориентированных графов, такие как графы атак [2]. Граф атак — это граф, который представляет всевозможные последовательности действий злоумышленника для достижения угроз (целей). Это позволяет выявить критически важные активы и угрозы даже в отсутствии информации о конкретных уязвимостях, обеспечивая проактивное управление безопасностью на основе комплексного понимания поведения атакующих и их намерений.

Исходя из вышесказанного целью работы является расширение методики по управлению уязвимостями с учетом невыявленных в процессе мониторинга уязвимостей.

Планируемым результатом исследования является разработанная методика управления уязвимостями, включающая методологию оценки активов по степени их критичности для обеспечения непрерывности бизнес-процессов.

Литература

1. Методический документ. Руководство по организации процесса управления уязвимостями в органе (организации) (утв. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю 17 мая 2023 г.).
2. **He W., Li H., Li J.** Unknown Vulnerability Risk Assessment Based on Directed Graph Models: A Survey // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 168201–168225. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2954092.

*А.Е. Называев, О.А. Глуздова, студ.;
рук. С.В. Попов, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНВЕЙЕРА ДЛЯ MLSECSOPS

Применение машинного обучения в DevSecOps делает проверку безопасности более ранней и регулярной на всех этапах разработки. Однако основными трудностями в реализации являются высокая сложность существующих решений и обеспечение точности ML-моделей. В работе решается задача разработки архитектуры и методов для встраивания ML в конвейер безопасности.

Цель исследования заключается в разработке архитектурных решений для автоматизированного конвейера MLSecOps и методов автоматической классификации уязвимостей в исходном коде. Также предполагается описать простой порядок обновления моделей и данных, чтобы их было удобно поддерживать и проверять при изменениях в проекте.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ подходов к применению ML для задач статического анализа безопасности кода (SAST).
2. Разработать методику классификации уязвимостей на основе ML-моделей (SVM, CNN).
3. Спроектировать модульную микросервисную архитектуру конвейера.

Для классификации уязвимостей будут применены модели машинного обучения. В качестве исходных данных будут использованы публичные датасеты с примерами уязвимого кода [1]. Дополнительно планируется сопоставление с записями о реальных уязвимостях (CVE) и их уровнях критичности (CVSS), чтобы сделать результаты более практичными для команд разработки. Критерии классификации основаны на стандартах OWASP Top 10 и CVSS. Для объективной оценки качества предусмотрена разбивка данных на части для проверки, а также понятные отчёты о том, сколько проблем система находит, сколько пропускает и сколько срабатываний оказалось лишними. Результатом работы станет комплекс архитектурных решений и методика применения ML для классификации уязвимостей, которые послужат основой для модулей, разрабатываемых соавтором. В состав результата войдут краткие инструкции по подключению к конвейеру, форматам данных и правилам обновления моделей без остановки основных процессов.

Литература

1. Software Assurance Reference Dataset (SARD) [Электронный ресурс]. — URL: <https://samate.nist.gov/SARD/> (дата обращения: 10.11.2025).

*А.В. Чернышов, студ.; ассист. А.Ю. Модорский, ст. п.;
рук. А.С. Минзов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И НАСТРОЙКИ ЗАЩИЩЁННОЙ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В КОНЦЕПЦИИ ZTNA

Начало 2020-х ознаменовалось массовым переходом сотрудников на удалённый формат работы в связи с чем бизнес столкнулся с проблемой удалённого подключения сотрудников и доверия к ним. Базовым решением послужило повсеместное внедрение VPN, но эта мера обеспечивала только защищённый канал, но никак не контролировало деятельность пользователей с удалёнными ресурсами, кроме административных ограничений в виде правил межсетевого экранирования и прав доступа. Это стало серьёзным риском безопасности, но в тоже время и удобством пользователей в виде работы из дома.

При этом возникает задача оценки уровня доверия к этим системам. Отсюда целью работы является применение подхода «нулевого доверия» к пользователям и их удалённым рабочим местам с помощью средств проверки соответствия требованиям (compliance check) для получения доступа к инфраструктуре компании, а также использование архитектурных подходов ZTA — инфраструктура VDI, контроль копирования и приложений [1]. В работе будут рассматриваться способы контроля с использованием агента на системе пользователя, который контролирует состояние системы. Основными факторами доверия служат — проверка целостности компонентов операционной системы, конфигурационных файлов, контроль процессов, цифровые подписи, контроль сетевые подключения. Такие проверки позволят динамически управлять уровнем доступа к ресурсам.

Таким образом, в процессе исследования необходимо будет сравнить различные системы безопасности и их компоненты, реализующие подход ZTNA при дистанционной работе пользователей на основе стандарта [2].

Планируемым результатом исследования является создание сравнительной таблицы по решениям в области ZTNA с методикой внедрения. Она будет описывать архитектуру систем, возможности, результаты тестов, сложность внедрения и иные критерии, а также соответствовать описанным мерам обеспечения ИБ из ГОСТ, что позволит обоснованно выбрать оптимальное решение для конкретной ИТ-инфраструктуры.

Литература

1. **NIST Special Publication 800-207** Zero Trust Architecture //National Institute of Standards and Technology — 2020.
2. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2021** «Свод норм и правил применения мер обеспечения информационной безопасности».

Д.Д. Нам, студ.; рук. И.В. Писаренко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ DLP-СИСТЕМ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ПРОВЕДЕНИЯ РАССЛЕДОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

В корпоративных информационных системах DLP-системы (Data Loss Prevention) являются одним из основных источников данных о событиях информационной безопасности и потенциальных утечках. Деятельность по обнаружению и регистрации компьютерных инцидентов опирается на результаты мониторинга [1], однако вопросы использования накопленных событий DLP-систем при служебном расследовании инцидентов проработаны недостаточно. Требуется понять, достаточно ли параметров, фиксируемых DLP-системой (атрибуты пользователя, рабочего места, объекта и канала передачи, времени и контекста операции), а также какие настройки правил, словарей и корреляционных механизмов необходимы, чтобы эти данные могли служить цифровыми доказательствами. При расследовании инцидентов важно обеспечить баланс между ошибками первого рода (ложные срабатывания) и второго рода (пропуск инцидента): избыток срабатываний перегружает аналитиков, а чрезмерная фильтрация приводит к потере значимой инцидентной информации.

Цель работы заключается в разработке методики выявления и расследования инцидентов утечки информации в корпоративных информационных системах с использованием DLP-систем. В рамках работы предполагается: проанализировать состав и структуру событий типовых DLP-систем с точки зрения их пригодности для расследований, определить минимально необходимый набор регистрируемых параметров для документирования инцидента, сформулировать требования к настройке политик и правил DLP-системы, обеспечивающих снижение доли ложных срабатываний при допустимом уровне пропуска, а также предложить алгоритм многоступенчатой дополнительной фильтрации и обработки DLP-событий для целей служебного расследования.

Планируемым результатом является методика выявления и расследования инцидентов утечки информации на основе данных DLP-систем, включающая требования к конфигурации системы, подходы к фильтрации инцидентной информации и правила работы с цифровыми доказательствами. Реализация методики позволит службам ИБ сократить время реагирования и разбора инцидентов, уменьшить долю ложных срабатываний и повысить качество документирования результатов расследований.

Литература

1. **ГОСТ Р 59712-2022.** Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Руководство по реагированию на компьютерные инциденты.

*А.А. Бондаренко, студ.;
рук. О.Р. Баронов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕХНОЛОГИИ РЕВЕРСИНГА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕДЕКЛАРИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ ПО

Современные подходы к обратному проектированию программного обеспечения (ПО) сталкиваются с проблемой усовершенствованных защитных механизмов, включающих обфускацию, упаковку, шифрование и методы противодействия отладчикам и песочницам, имитирующим работу настоящих операционных систем и окружений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности выявления недекларированных возможностей ПО в условиях появления новых языков программирования и методов запутывания исходного кода, затрудняющих традиционный реверсивный анализ [1].

Цель исследования состоит в разработке методики реверсивного анализа, которая позволяет преодолеть современные механизмы защиты ПО для обнаружения недекларированных возможностей и которая в дальнейшем может быть использована для обучения аналитиков кода.

К задачам исследования отнесены: выявление ключевых особенностей компиляторов современных языков программирования и их влияния на сложность проведения анализа, разработка техник противодействия обнаружению песочниц через мониторинг аномалий в регистрах памяти, рассмотрение кейсов с процедурами определения точки входа, гибридного статико-динамического и дифференциального анализа через сравнение признаков оригинального и модифицированного образцов ПО.

Для идентификации компиляторов и обнаружения упаковщиков используется приложение Detect It Easy, что обусловлено способностью выявлять обфускации. Для проведения статического анализа применяется фреймворк Radare2, поскольку им поддерживаются архитектуры x86 и ARM, а также несколько форматов бинарных файлов. Отслеживание динамических вызовов API и состояния регистров памяти в режиме реального времени обеспечивает приложение x64dbg. Анализ уязвимостей или сбоев при некорректных и случайных входных данных для программы осуществляется посредством фаззинга.

Практическим результатом работы является методика обратного проектирования, содержащая кейсы гибридного и дифференциального анализа для исследования недекларированных функций в защищенном ПО, написанном в том числе на таких языках программирования, как Go и Rust, и использующем методы антиотладки и противодействия песочницам.

Литература

1. **Komolafe O. et al.** Reverse Engineering: Techniques, Applications, Challenges, Opportunities // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. Т. 6. № 8.

О.В. Иванников, студ.;
рук. А.С. Минзов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ

Быстрый рост масштаба и сложности киберугроз требует регулярной, воспроизводимой оценки устойчивости периметра. Межсетевые экраны (МЭ) критичны для защиты, однако ошибки конфигурирования и различия реализаций приводят к уязвимостям и обходам политики. Предлагается технология, включающая формализацию модели угроз, генерацию эталонных сценариев трафика (нормального и атакующего), их эмуляцию на стенде и расчёт метрик защищённости по реакции МЭ.

Подход объединяет статическую проверку правил и динамическое моделирование в тестовой сети. На вход подаются конфигурация МЭ и описание зон/сервисов; на выходе — перечень аномалий и метрики:

1. Модель угроз. Активы и границы доверия задаются через зоны, сервисы и роли пользователей; для нарушителя фиксируются точка входа и допущения. Векторы воздействия описываются как сценарии (источник–цель–действие–условия) с ожидаемым решением МЭ;
2. Модель объекта защиты. Конфигурация МЭ переводится в унифицированное представление: объекты адресов/сервисов, порядок правил, зоны/интерфейсы, NAT и профили безопасности. На этой модели вычисляется итоговое решение для потока и сопоставляется с эталоном;
3. Генератор сценариев. Из сценариев угроз синтезируются тест кейсы с параметрами трафика (адреса, порты, протоколы, интенсивность, признаки обхода). Для каждого кейса задаётся эталон: разрешение/блокировка, ожидаемое срабатывание правила;
4. Эмуляция и телеметрия. Тест-кейсы воспроизводятся в изолированном стенде (VM/контейнеры); собираются решения МЭ (drop/allow), счётчики попаданий в правила и логи/алерты;
5. Статический анализ политики. Выявляются затенение и пересечения правил, конфликты deny/permit, избыточные «апу», пробелы в сегментации и несогласованность зон/NAT.

Предложена воспроизводимая технология моделирования уязвимостей МЭ, объединяющая статический анализ политик и динамическую эмуляцию сценариев с расчётом метрик защищённости. Воспроизводимость обеспечивается декларативным описанием моделей и автоматизацией развёртывания стенда.

Литература

1. NIST. SP 800-41 Rev.1. Guidelines on Firewalls and Firewall Policy. 2009. [Электронный ресурс].

Р.С. Полев, студ.; рук. А.С. Минзов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Существующие реактивные методы защиты, основанные на сигнатурном анализе, часто оказываются недостаточными для своевременного предотвращения целевых атак. Следовательно, для обеспечения информационной безопасности необходимо использование технологий проактивной защиты, обнаруживающих аномальную активность, в том числе и сетевую, на ранних стадиях атаки.

Таким образом, целью данного исследования является сравнительный анализ эффективности выбранных методов машинного обучения «Random Forest», «XGBoost», «Isolation Forest» и «Autoencoder» для обнаружения аномалий в сетевом трафике.

Задачами работы являются: сбор данных сетевых событий и формирование размеченного набора данных для обучения; обучение моделей на сформированных наборах данных; имитация сетевой атаки на защищаемую ИС; анализ данных сетевого трафика моделями и сравнение эффективности моделей по выбранным критериям.

Сбор нормализованных данных производится с помощью SIEM-системы на базе ELK. Собираемые данные включают данные с маршрутизаторов, события системы обнаружения вторжений и журналов мониторинга подключений на конечных точках. Наборы данных предварительно размечаются, формируется поле события, отображающее нормальную или аномальную активность [1].

При формировании набора данных для обучения моделей производится создание признаков, таких как адрес назначения, адрес источника, протокол, порт, количество байт в пакете, длительность соединения, сервис, на основании полей событий из SIEM — системы. События для нормальной сетевой активности формируются из обычного сетевого трафика в ИС, события для аномальной активности формируются из событий имитационных атак на ИС.

Планируемым результатом работы является сравнительная оценка полученных моделей по критериям общей точности обнаружения аномалий, количеству ложных положительных срабатываний, времени обучения модели и времени обнаружения.

Литература

1. **Alieyan K., Almomani A., Anbar M.,** A Survey of Intrusion Detection Systems Based on Network Dataset // International Journal of Computer Science and Network Security — 2021.

*А.Е. Называев, О.А. Глуздова, студ.;
рук. С.В. Попов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНВЕЙЕРА ДЛЯ MLSECOPS

Эффективность современных систем MLSecOps напрямую зависит от их способности своевременно адаптироваться к новым типам угроз и минимизировать количество ложных срабатываний. Рост кибератак и усложнение сетей требуют внедрения интеллектуальных решений, способных выявлять аномалии и корректировать модели в реальном времени, модели на основе накопленного опыта. На этом фоне ключевое значение приобретают самообучающиеся MLSecOps-системы, в которых машинное обучение внедряется в мониторинг и реагирование на угрозы.

Целью работы является разработка методики адаптации ML-моделей в автоматизированном конвейере MLSecOps на основе анализа логов, лабораторных сценариев атак и экспертной обратной связи.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Изучение современных методов применения машинного обучения для обнаружения аномалий в логах;
2. Разработка механизма итеративного дообучения моделей с использованием корректирующей обратной связи аналитиков;
3. Формирование рекомендаций по сбору, нормализации и унификации логов для повышения качества работы ML-моделей.

Обучающий набор данных будет формироваться из двух ключевых источников. Первый источник — современные открытые датасеты, применяемые в исследованиях по кибербезопасности, включая CSE-CIC-IDS2018, содержащий репрезентативные примеры сетевых атак и нормального трафика [1]. Вторым источником — данные, полученные в изолированной лабораторной среде, где будут воспроизводиться атакующие сценарии в соответствии с матрицей MITRE ATT&CK. Для генерации атак планируется использовать инструменты CALDERA, Atomic Red Team и Metasploit. Лаборатория будет собирать Windows Event Log, syslog, auditd, сетевые потоки, а также логи Kubernetes и приложений.

Ожидаемым результатом исследования является разработка методики адаптации ML-моделей, интегрируемой в конвейер MLSecOps. Подход повысит устойчивость и точность систем обнаружения угроз через объединение актуальных данных, лабораторных атак.

Литература

1. Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization // ICISSP. — 2018. — URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2018/66398/66398.pdf> (дата обращения: 18.11.2025).

Д.А. Рябцев, студ.; рук. А.Ю. Невский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛОКАЛЬНОГО СЕТЕВОГО СЕГМЕНТА ОРГАНИЗАЦИИ К АТАКАМ НА ОСНОВЕ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ И АНАЛИЗА ПУТЕЙ АТАКИ

Современные кибератаки представляют собой многошаговые сценарии (цепочки атаки), включающие разведку, горизонтальное продвижение и достижение цели. Традиционные методы оценки, основанные на анализе отдельных уязвимостей, не позволяют оценить контекстную достижимость критически важных активов в рамках сложной сетевой топологии. Возникает научная задача по разработке методики, позволяющей количественно оценить уровень защищенности сегмента от совокупности таких воздействий.

Целью работы является разработка методики комплексной оценки защищенности локального сетевого сегмента, основанной на синтезе инструментального сбора данных и графового моделирования путей распространения атак.

В качестве объекта исследования рассматривается локальный сетевой сегмент, включающий компоненты уровня доступа и пограничный сегмент (ДМЗ) с типовыми сервисами. Методология предполагает автоматизированный сбор данных о топологии сети и параметрах конфигурации узлов. На основе анализа собранных данных выявляются потенциальные векторы реализации угроз, которые служат базисом для построения ориентированного графа атак.

В данной модели узлами выступают информационные активы, а дугами — возможные шаги нарушителя. Каждой дуге присваивается весовой коэффициент, характеризующий сложность эксплуатации уязвимости или вероятность успешного преодоления данного рубежа защиты. Такая постановка позволяет свести задачу оценки защищенности к математической задаче поиска кратчайшего пути в графе.

Ключевым показателем защищенности выступает расчетная сложность компрометации целевого актива — минимальная совокупная стоимость пути от точки входа в сеть до критического узла. Чем выше стоимость кратчайшего пути, тем выше уровень защищенности сегмента.

Планируемым результатом является методика, позволяющая проводить сценарный анализ для обоснования мер защиты. Моделирование устранения уязвимостей (удаление дуг графа) позволяет количественно оценить прирост защищенности и выбрать наиболее эффективные меры. Практическим результатом станет программный прототип, автоматизирующий процесс построения графа и расчет метрик.

Литература

1. NIST Special Publication 800-115. Technical Guide to Information Security Testing and Assessment — [Электронный ресурс]. URL: <https://clcl.i/YfacU> (дата обращения 03.11.2025).
2. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: Specification Document — [Электронный ресурс]. URL: <https://clcl.i/mqGLq> (дата обращения 03.11.2025).

Н.В. Казакова, студ.; рук. А.Ю. Невский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ АРТ-ГРУППИРОВОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНЦИДЕНТОВ БЕЗОПАСНОСТИ И ТАКТИК MITRE ATT&CK

Рост числа и сложности АРТ-атак требует ускорения принятия решения при анализе инцидентов и повышения интерпретируемости получаемых результатов. В качестве решения данной проблемы предлагается использование больших языковых моделей, которые при интеграции с базами знаний способны анализировать текстовую информацию, структурированные данные и автоматически предлагать классификацию признаков, относящихся к конкретным тактикам и техникам атак [1]. Такой подход может обеспечивать поддержку аналитиков, ускорять процесс анализа и формировать аргументированные гипотезы о вероятной принадлежности инцидента к известным группировкам типа АРТ.

Входными данными для разрабатываемого решения являются текстовые отчёты о кибератаках, аналитические заметки, идентификаторы компрометации и иные описания действий злоумышленников. Эти данные содержат сведения о применённых инструментах, командах, временных зависимостях и инфраструктурных признаках.

Выходными данными являются: перечень идентифицированных тактик и техник атак в соответствии с моделью MITRE ATT&CK, вероятностная оценка принадлежности наблюдаемых действий к конкретной АРТ-группе, а также пояснение, включающее ключевые признаки и элементы поведения, на основании которых сформированы соответствующие гипотезы.

Процесс анализа представляет собой последовательность этапов, начинающихся с предварительной обработки данных, включающей нормализацию текста и извлечение ключевых параметров, после чего выполняется контекстный анализ для выявления причинно-следственных и временных связей между событиями. На основе установленной логической последовательности действий осуществляется их сопоставление с тактиками и техниками с использованием методов вычисления сходства и вероятностных моделей для оценочной (вероятностной) идентификации соответствующих техник. Итоговый этап включает формирование профиля события — совокупности поведенческих, временных и инфраструктурных параметров, — который может быть сопоставлен с известными моделями поведения АРТ-групп для вычисления степени их сходства.

Литература

1. Mohamed Amine Ferrag, Mthandazo Ndhlovu, Norbert Tihanyi, Lucas C. Cordeiro, Merouane Debbah, and Thierry Lestable Revolutionizing Cyber Threat Detection with Large Language Models // Proceedings of the 7th International Conference on Cyber Security, Cryptography and Machine Learning. — 2023.

П.А. Марков, студ.; рук. С.В. Попов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА ПРОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО АУДИТА

Современные информационные системы характеризуются высокой степенью сложности и динамичным развитием, что приводит к увеличению числа потенциальных уязвимостей, ошибок конфигурации и несоответствий требованиям безопасности. В этих условиях особо актуальной становится автоматизация процессов аудита, направленных на объективную оценку состояния информационной инфраструктуры и проверку её соответствия международным стандартам информационной безопасности [1].

Целью данной работы является разработка системы проведения автоматизированного компьютерного аудита, обеспечивающей комплексный анализ защищённости информационных систем и автоматическое формирование отчётной информации о выявленных нарушениях. Разрабатываемая система должна выполнять регулярный сбор данных о состоянии инфраструктуры, оперативно выявлять уязвимости и отклонения от установленных политик, а также предоставлять аналитические сведения, необходимые для поддержки процесса управления информационными рисками.

В рамках исследования проводится анализ существующих методов и инструментов автоматизированного аудита, а также проектируется архитектура программного комплекса, включающая модули сбора, обработки и анализа данных. Особое внимание уделяется разработке алгоритмов проверки соответствия требованиям нормативных документов и внутренним политикам безопасности организации. В качестве методической основы предполагается использовать рекомендации OWASP Security Testing Guide, обеспечивающие структурированный подход к оценке защищённости приложений [2].

Результатом работы станет создание прототипа системы автоматизированного компьютерного аудита, способного осуществлять всестороннюю оценку состояния информационной безопасности в автоматическом режиме. Внедрение разработанного решения позволит повысить объективность и точность аудиторских проверок, снизить трудозатраты специалистов, а также обеспечить постоянный контроль уровня защищённости корпоративной инфраструктуры.

Литература

1. **ISO/IEC 27001:2022** Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection — Requirements.
2. OWASP Security Testing Guide v5.0, 2024.

*А.В. Романников, студ.;
рук. А.С. Минзов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ АУДИТА УСТОЙЧИВОСТИ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ К ТЕХНОЛОГИЯМ СОЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Согласно исследованию Positive Technologies, количество фишинговых атак в 2024 году выросло на 33% по сравнению с 2023 годом и на 72% по сравнению с 2022 годом [1]. Данное исследование отражает актуальность проявления методов социальной инженерии в нынешнее время.

Работа посвящена разработке методов и технологий проведения инструментального аудита в организации, с целью определения готовности персонала организации к противодействию фишинговым атакам. Поставленная задача достигается путем моделирования фишинговой атаки по заранее согласованному плану с руководством организации. Атака предполагает отправку фишингового письма сотрудникам организации, с последующей фиксацией реакции пользователей. Оценка реагирования основывается на полученных показателях, таких как пользователь открыл письмо u_1 , переход по ссылке u_2 , заполнение формы u_3 и скачивание файла u_4 , где $u_i \in \{0,1\}$. Для оценки полученных показателей фишинговой атаки сформирована формула (1) критериев оценки F , отражающая критичность реагирования пользователей на фишинговую атаку. В формуле учитывается последовательность возникновения показателей пользователя и в случае появления значения «0», дальнейшие показания в последовательности не учитываются.

$$F = u_1 \wedge u_2 \wedge u_3 \wedge u_4 \quad (1)$$

Для оценки полученных показателей сформированы критерии оценки в виде уровней критичности от 0 до 5. В том случае, если пользователь получил письмо, проигнорировал или открыл его, то устанавливается низкий уровень риска от 0 до 1, в ином случае пройдя всю цепочку фишинговой атаки от открытия письма до скачивания, выставляется критический уровень риска 5.

Ожидаемый результат работы заключается в проведении фишинговой атаки с последующей оценкой и формировании методики проведения инструментального аудита по противодействию фишингу.

Литература

1. Positive Technologies: количество фишинговых атак выросло на треть за год // Positive Technologies URL: <https://ptsecurity.com/about/news/positive-technologies-kolichestvo-fishingovyh-atak-vyroslo-na-tret-za-god/> (дата обращения: 18.11.2025).

И.Р. Тимиргалеев, студ.;
рук. А.Ю. Невский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЫЯВЛЕНИЕ ИНЦИДЕНТОВ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ АТАКАМ НА ОБЪЕКТЫ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИБЕРПОЛИГОНА

Современное развитие технологий привело к созданию сложных информационных систем для управления объектами критической инфраструктуры. Эти системы включают промышленные сети, SCADA-компоненты и распределенные вычислительные комплексы, которые обеспечивают функционирование энергетических, транспортных и телекоммуникационных объектов. Особенностью таких систем является их высокая значимость для национальной безопасности [1].

Киберполигон представляет собой специализированную платформу для моделирования информационной инфраструктуры, в том числе критических объектов. Это позволяет проводить эксперименты без риска для действующих объектов.

Однако существует проблема эффективного использования возможностей киберполигона для отработки действий по выявлению и нейтрализации кибератак. Отсюда целью работы является разработка методики применения киберполигона для обнаружения инцидентов и противодействия атакам на объекты КИИ. Данный подход позволяет создать условия для реалистичного тестирования систем защиты и подготовки специалистов.

Таким образом, в процессе исследования необходимо разработать комплекс моделей и сценариев, специфичных для различных типов объектов КИИ. Это включает создание библиотеки типовых инцидентов безопасности, разработку методик оценки эффективности защитных мер и формирование рекомендаций по совершенствованию систем обнаружения атак.

Планируемым результатом исследования является создание практического руководства по использованию киберполигона для защиты объектов КИИ. Руководство будет включать описание типовых конфигураций тестовых стендов, каталог сценариев атак и процедур реагирования, а также методику анализа результатов испытаний. Это позволит ОКИИ эффективно использовать возможности киберполигона для повышения уровня своей защиты от кибератак.

Литература

1. **Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239** «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

Д.Ю. Краснов, студ.;
рук. С.В. Потехецкий, к.т.н. с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

МЕХАНИЗМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ДОВЕРИЯ В АСУ ТП

Современные АСУТП требуют динамических механизмов доверия, которые обеспечивает ГОСТ 15408-3-2013. Стандарт предполагает статичную однократную сертификацию без формальной верификации поведения системы и адаптации к эволюционирующим угрозам. Ключевые ограничения включают отсутствие формализации, невозможность автоматической верификации, статичность оценки и сложность обновления при изменении архитектуры системы.

Event-B как формальный метод обеспечивает строгое описание системы доверия через инварианты. В сравнении с ГОСТ 15408-3-2013, методология Event-B обеспечивает формализованную верификацию систем, что позволяет достичь более высокой степени уверенности в их надежности. Event-B предоставляет возможность динамической адаптации уровней доверия в зависимости от поведения системы и внешних факторов.

Инварианты в Event-B играют основную роль. Они представляют собой предикаты, которые должны быть истинны в любом достижимом состоянии системы. Инварианты выражают ключевые свойства безопасности системы — то, что никогда не должно нарушаться [1].

Основной идеей методологии является принцип постепенного уточнения, так как попытка создать полную детальную модель сложной системы сразу обречена на провал из-за когнитивных ограничений человека. Вместо этого следует начинать с очень абстрактной модели, которая захватывает только самые существенные аспекты системы, а затем постепенно добавлять детали через серию уточнений.

Каждое событие может иметь параметры (ANY), которые представляют данные, специфичные для конкретного срабатывания события. Охранные условия (WHERE) определяют, когда событие может произойти — это предикаты, которые должны быть истинны для текущего состояния и выбранных значений параметров. Действия (THEN) описывают, как изменяется состояние системы при срабатывании события.

Планируемым результатом исследования является доказательная база превосходства модели Event-B в сравнении с стандартом, так как включает исключение логических ошибок на этапе проектирования. Формальная верификация гарантирует формализованную доказанную безопасность, а пошаговое уточнение обеспечивает постоянно обновляющуюся разработку систем.

Литература

1. **Abrial, J.-R.** Modeling in event-b: system and software engineering. // Cambridge: Cambridge University Press.

А.Ю. Игнатов, студ.; рук. А.С. Минзов, профессор, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИНТЕГРАЦИЯ OSINT-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЫ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Современные угрозы всё чаще формируются на основе данных, полученных из открытых источников. Цель исследования — интеграция OSINT в процессы оценки защищённости ИС, где в рамках работы будет разработано приложение для автоматизации OSINT-разведки, включающее модуль сбора публичных данных и рассчитанное на соответствующее внедрение. Защищённость информации следует понимать как соответствие состава принятых мер по ЗИ составу мер, установленному требованиями нормативного документа, по которому оценивается эта защищённость.

Законодательство устанавливает методики оценки защищённости ИС, предусматривающие дифференцированный подход, основанный на выделении классов и уровней защищённости. Поэтому защищённость в Российском законодательстве рассматривается в связке с классом защищённости ИС. Методики оценки защищённости приведены в следующей таблице. [1]

Таблица 1.

Документ	Классификация и критерии защищённости
Приказ ФСТЭК № 117	Определяются показатели текущей защиты от базовых угроз, достаточности и эффективности мер защиты
ПП РФ № 1119 и Приказ ФСТЭК № 21	Определяются уровни защищённости в зависимости от типа угроза, категории ПДн и других
Приказ ФСТЭК № 17	Определяются классы защищённости 4 уровня в зависимости от масштаба ИС
COBIT 5.0	Определяются 6 уровней зрелости, характеризующие уровень защищённости объекта
ISO/IEC 27001:2022	93 меры контроля
NIST SP 800-53	Определяются три уровня защищённости ИС

Анализ таблицы показывает, что в зависимости от характера и значимости информации защищаемого объекта необходимо создать систему, позволяющую оценивать защищённость ИС на основе различных методических материалов. То есть, требуется создать решение, которое обеспечивало бы возможность применения разных методик оценки защищённости для объектов с различной обрабатываемой информацией.

Разрабатываемое OSINT-средство должно быть комплексным и обеспечивать возможность оценки по нескольким направлениям. Полноценная картина оценки защищённости может быть получена только при его использовании в сочетании с методами оценки рисков.

Литература

1. Лившиц И.И., Бакшеев А.С. / Исследование методик контроля уровня защищённости информации на объектах критической информационной инфраструктуры // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 6 (52).

Д.А. Горбатов, студ.; рук. И.В. Писаренко, доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЁННОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Современные информационные системы содержат большое количество сведений о человеке, и утечка таких данных создаёт прямые риски для субъекта персональных данных. Опасность для пользователя возникает не только из-за возможного раскрытия конфиденциальной информации, но и из-за широкого спектра угроз, которые могут быть реализованы в отношении человека при компрометации его цифрового профиля [4]. Это делает задачу оценки рисков для субъекта ПДн особенно актуальной.

Угрозы, возникающие при утечке ПДн, включают фальсификацию личности, шантаж, психологическое давление, сбор и анализ предпочтений пользователя, отслеживание геолокации, компрометацию финансовых данных, выполнение действий от лица субъекта ПДн и другие формы воздействия. Характер угроз определяется тем, какие данные были раскрыты и насколько они позволяют идентифицировать человека или реконструировать его цифровую активность. Таким образом, риски напрямую связаны с составом обрабатываемых сведений и особенностями их распространения.

В рамках исследования предлагается рассматривать защищённость ПДн не как техническую характеристику информационной системы, а как способность минимизировать возможный ущерб субъекту данных при их утечке. Необходимость создания моделей, которые учитывают задачи, решаемые с использованием ПДн, и определяют степень опасности для субъекта в зависимости от набора раскрытых признаков. Особое внимание уделяется вероятностной природе идентификации и возможности групповых угроз пользователям.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенный подход позволяет оператору ПДн оценить возможные последствия утечки для пользователя и сформировать обоснованные требования к объёму собираемых данных, их обработке и контролю ответственности.

Литература

1. Минзов А.С., Невский А.Ю., Баронов О.Р. Безопасность персональных данных: новый взгляд на старую проблему // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 4(50).
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Защита информации. Методы и средства оценки рисков информационной безопасности.
3. Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».

М.С. Иванов, студент; рук. И.В. Писаренко, доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА РАССЛЕДОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SIEM

В условиях роста числа кибератак на ИС увеличивается число инцидентов ИБ, требующих оперативного расследования. Их большой объём затрудняет своевременный анализ. Согласно приказу ФСБ России от 19.06.2019 №282, расследование инцидента не должно превышать 48 часов, однако на практике это не всегда выполнимо. Существующие методики расследования инцидентов ИБ определяют порядок действий при расследовании, но игнорируют временные ограничения, что снижает оперативность реагирования и полноту восстановления картины инцидента.

Разрабатываемая методика должна устранить временные ограничения за счёт применения практических механизмов автоматизации расследований, основываясь на ранней приоритизации инцидентов с помощью вычисления индекса срочности (s), который представляется как:

$$s = w_a a + w_k k + w_c c, \quad (1)$$

где a — число задействованных устройств; k — уровень критичности ресурсов; c — количество связанных событий; w_a , w_k , w_c — коэффициенты веса, определяемые из анализа прошлых инцидентов. Однако только индекса срочности недостаточно: длительные расследования высококритичных инцидентов могут привести к пропуску менее критичных, потенциально эволюционирующих в серьёзные угрозы. Для этого вводится индекс очерёдности обработки инцидентов (q):

$$q = 1/s + \lambda t, \quad (2)$$

где t — время с момента регистрации, λ — вес временного фактора. Эта формула обеспечивает раннюю обработку инцидентов низкой критичности, предотвращая длительное ожидание по любому инциденту за счёт роста временной составляющей. Методика будет формировать хронологию атаки на основе приведения событий к единому формату, синхронизации временных меток и автоматического объединения событий в логические цепочки на основе процессов, сетевых соединений и учётных записей [1].

Результатом работы станет методика расследования инцидентов ИБ с использованием SIEM, сокращающая время расследования и позволяющая выстроить причинно-следственные связи между событиями. Её применение поможет выявлять аналогичные инциденты в будущем и предотвращать их за счёт улучшения анализа цепочек событий ИБ.

Литература

1. От сырых логов к киберугрозам: Практическое руководство по построению детекций в SIEM. SEC-1275-1 [Электронный документ], (URL: clck.ru/3QU5ye).

М.С. Косырев, студ.; рук. С.В. Попов (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ АУДИТА КОНТРОЛЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ФИНАНСОВО-КРЕДИТНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ

В настоящее время в финансовом секторе Российской Федерации существенно возрастает актуальность вопросов информационной безопасности. Данная тенденция определяется совокупностью ключевых факторов. С одной стороны, наблюдается ужесточение регуляторных требований Банка России, в частности, вступление в силу Положения ЦБ РФ от 30.01.2025 № 851-П [1]. С другой — активное развитие онлайн-банкинга, мобильных приложений и облачных сервисов расширяет «поверхность атаки». Также сохраняется необходимость соблюдения как международных, так и национальных стандартов в сфере информационной безопасности. Всё это объективно требует систематического аудита контроля защищённости финансово-кредитных учреждений.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованных рекомендаций по повышению эффективности такого аудита. Для её достижения необходимо провести комплексный анализ современных методов и технологий, систематизировать аудиторские подходы и защитные инструменты, оценить их соответствие регуляторным требованиям и стандартам, а также автоматизировать его проведение. Существенное значение имеет также выявление типовых уязвимостей и рисков финансово-кредитных организаций, а также определение перспективных направлений развития аудита.

В процессе исследования будут разработаны критерии оценки уровня защищённости финансово-кредитных учреждений, сформированы соответствующие методики аудита и определена оптимальная последовательность их применения; ключевым результатом станет создание комплексного критерия оценки, интегрирующего такие параметры, как соответствие нормативным требованиям регуляторов и международным стандартам, эффективность применяемых технологических инструментов и программно-аппаратных решений.

Итогом работы станет формирование целостной картины состояния аудита защищённости в финансовом секторе РФ. Будут предложены практические меры по усилению защиты данных, повышению устойчивости к современным киберугрозам, а также обеспечению соответствия регуляторным требованиям и международным стандартам.

Литература

1. **Положение Банка России от 30.01.2025 № 851-П** «О требованиях к обеспечению защиты информации в сфере финансовых рынков». — Москва : Банк России, 2025.

В.А. Первакова, студ.; рук. А.Ю. Невский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ LOG-ФАЙЛОВ В SIEM-СИСТЕМАХ

Современные корпоративные инфраструктуры формируют значительные объёмы событий информационной безопасности, что приводит к перегрузке SIEM-систем и увеличению доли ложноположительных срабатываний. Традиционные механизмы фильтрации не обеспечивают достаточную точность при анализе разнородных log-файлов, поэтому актуальной задачей является применение методов кластеризации для автоматической группировки событий и выделения потенциально аномальной активности.

Предлагаемый подход опирается на многоэтапную обработку данных. На этапе предобработки выполняются нормализация и унификация атрибутов log-файлов, а также исключение нерелевантных и некорректно сформированных записей. Далее используется набор алгоритмов кластеризации, позволяющих группировать события по совокупности временных, сетевых, идентификационных и семантических признаков.

В рамках исследования проводится сравнительный анализ трёх наиболее применимых для SIEM-систем методов кластеризации. Алгоритм K-means формирует события в группы по средним значениям их признаков и эффективно работает при достаточно однородном распределении данных. Метод DBSCAN анализирует плотность распределения данных, выделяет устойчивые кластеры и определяет нетипичные события как выбросы, характерные для аномальной активности. Иерархическая кластеризация предоставляет возможность анализа вложенных структур и выявления взаимосвязей между различными типами событий.

Определение аномальных кластеров осуществляется по совокупности критериев: плотности распределения, удалённости центроидов от нормативных значений, отклонения по временным, сетевым и поведенческим параметрам.

По результатам анализа определяется оптимальный алгоритм для кластеризации событий аутентификации и сетевого трафика. Полученные результаты могут быть использованы для повышения качества обнаружения угроз и соответствуют принципам мониторинга [1], при этом предлагаемый подход интегрируется в существующую архитектуру SIEM без необходимости её модификации.

Литература

1. **ГОСТ Р. 59547-2021.** Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения // М.: Стандартинформ. — 2021.

Секция 21
ПРИКЛАДНАЯ И БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА
Applied and business Informatics

Председатель секции: к.т.н., доцент Крепков Игорь Михайлович

Секретарь секции: Денисенко Вера Константиновна

*А.Н. Кошелев, студ.; В.К. Денисенко, соиск.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРЕЙМВОРКОВ РАЗРАБОТКИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ БИЗНЕС-ЗАДАЧИ

Современные бизнес-процессы требуют новых, масштабируемых и безопасных веб-приложений. Выбор оптимального технологического стека является критически важным фактором, влияющим на стоимость, сроки разработки и дальнейшую поддержку продукта. Классические подходы часто не принимают во внимание специфику бизнес-задач, таких как высокая нагрузка, интеграция и необходимость быстрого вывода на рынок.

Фреймворки backend-разработки (Django, .NET Core) и frontend-разработки (React, Angular, Vue.js) предлагают различные модели и инструменты для создания бизнес-приложений. Сравнительный анализ по ключевым критериям производительности, безопасности, наличию ORM, скорости разработки и размеру сообщества позволяет объективно оценить пригодность фреймворка для конкретной задачи [1]. Для высоконагруженных систем предпочтение отдается компилируемым языкам и легковесным фреймворкам Go и Rust, в то время как для стартапов и CRM-систем оптимальным решением будет Django.

Интеграция low-code платформ и использование микросервисной архитектуры с такими фреймворками, как Micronaut или Quarkus, открывают новые возможности для создания гибких и легко тестируемых решений [2].

Правильный выбор стека технологий напрямую определяет конкурентные преимущества бизнеса в цифровой среде.

Литература

1. **Фаулер М., Льюис Дж.**, Микросервисы: паттерны разработки и рефакторинга. — М.: Диалектика, 2021. — 288 с.
2. **Ричардсон К.**, Микросервисы: паттерны проектирования. — СПб.: Питер, 2020. — 352 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; В.К. Денисенко, соиск.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОГРАММИРОВАНИЕ В EXCEL ПРИ ПОМОЩИ VBA

Бизнес-задачи, связанные с обработкой данных, часто требуют автоматизации рутинных операций в таблицах Excel. Несмотря на обилие специализированных программных решений, Excel остается ключевым инструментом благодаря своей гибкости. Однако ручная работа в нем является ресурсоемкой и подвержена ошибкам.

Язык программирования VBA (Visual Basic for Applications), интегрированный в пакет Microsoft Office, предоставляет средства для создания макросов, пользовательских функций и интерфейсов, позволяя трансформировать стандартные электронные таблицы в бизнес-приложения. Сравнительный анализ по критериям скорости выполнения задач, глубине интеграции со средой Excel, простоте освоения и возможности взаимодействия с внешними источниками данных демонстрирует его эффективность для автоматизации внутренних процессов, таких как формирование сложных отчетов, консолидация данных и моделирование [1].

Интеграция VBA-решений с корпоративными базами данных и другими приложениями пакета Office, через COM-технологии, открывает возможности для построения автоматизированных рабочих мест без привлечения сложных сред разработки.

Программирование на VBA остается актуальным и экономически эффективным способом повышения производительности труда и снижения операционных рисков в бизнес-среде.

Литература

1. **Яковлева Е., Комолова Н.** Программирование на VBA в Excel. Самоучитель. — СПб.: BHV-СПб, 2024. — 512 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ОТКАЗОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Прогнозирование отказов гидравлических систем является критически важной задачей для обеспечения надежности и безопасности промышленного оборудования. Традиционные методы диагностики, основанные на пороговых значениях вибрации, часто оказываются недостаточно эффективными для раннего обнаружения развивающихся дефектов [1].

Предлагаемый подход использует методы машинного обучения для анализа виброакустических сигналов, позволяя выявлять скрытые паттерны, предшествующие отказам. Для обработки сырых сигналов вибрации применяется выделение признаков временной и частотной области, таких как среднеквадратическое значение, амплитуда и форма сигнала. Для классификации состояний системы сравнивается эффективность алгоритмов Random Forest и Gradient Boosting.

Для повышения точности прогнозирования на ранних стадиях деградации используется глубокое обучение, в частности одномерные сверточные нейронные сети (1D-CNN), способные автоматически извлекать значимые признаки из исходных вибросигналов. Важным аспектом является разработка системы интерпретации результатов, обеспечивающей инженеров информацией о наиболее значимых диагностических признаках и степени критичности состояния системы.

Литература

1. **Воронцов К.В.**, Машинное обучение и искусственный интеллект для обработки текстов и анализа данных: учебный курс. — М.: МФТИ, 2021. — 367 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЯХ

Производственные линии требуют высокие требования к точности и надежности измерительного оборудования. Регулярная калибровка таких приборов, как манометры, является обязательной процедурой, которая обеспечивает контроль качества продукции и безопасность процессов. Традиционная ручная калибровка требует временных затрат, высокой концентрации оператора и подвержена влиянию субъективного фактора, что может привести к ошибкам.

Технологии компьютерного зрения предоставляют возможность для автоматизации этого процесса. Интеграция систем машинного зрения в калибровочные стенды позволяет создать высокоскоростные, точные и полностью автоматизированные рабочие места.

Автоматизация обеспечивает высокую скорость калибровки. Система автоматически документирует результаты и легко масштабируется. Однако внедрению могут мешать высокие требования к оборудованию и сложность первоначальной настройки алгоритмов.

Применение методов компьютерного зрения для автоматизации калибровки измерительных приборов переводит производственный процесс на новый этап. Данная технология не только значительно повысит эффективность и точность контроля, но и обеспечит полную прослеживаемость результатов. Несмотря на существующие решения, связанные с разнообразием приборов, развитие нейросетевых подходов позволяет успешно с ними справляться, делая автоматическую калибровку стандартом для высокотехнологичных предприятий [1].

Литература

1. **Сацюк А.**, Компьютерное зрение и нейронные сети. Практика: учебное пособие. — М.: Инфра-Инженерия, 2025. — 364 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОДБОРА НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В УЗКОПРОФИЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИНАХ

Подбор подходящей научной литературы в узкопрофильных дисциплинах сопряжен с системными трудностями, обусловленными малой выборкой подходящих материалов, специфической терминологией и высокими требованиями к точности рекомендаций [1].

Традиционные алгоритмы фильтрации демонстрируют низкую эффективность в условиях крайней разреженности матрицы «пользователь-предмет». Адаптация гибридного подхода, комбинирует конкретную фильтрацию на основе современных методов обработки естественного языка BERT и SciBERT для семантического анализа аннотаций, метаданных и полнотекстовых публикаций.

Для нивелирования проблемы холодного старта и работы с редкими терминами применяются графовые нейросети, анализирующие гетерогенные графы знаний, включающие связи цитирования, соавторства и тематической близости. Важным аспектом является разработка механизма объяснимого искусственного интеллекта, предоставляющего пользователю обоснование рекомендации на основе ключевых терминов и цитат.

Литература

1. **Воронцов К.В.**, Машинное обучение и искусственный интеллект для обработки текстов и анализа данных: учебный курс. — М.: МФТИ, 2021. — 367 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ЗАЩИТА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОТ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ УГРОЗ

В цифровизации и росте киберугроз обеспечение безопасности бизнес-процессов становится критически важным элементом развития любой организации. Угрозы исходят как извне, так и изнутри. Комплексный подход к защите позволяет минимизировать риски и обеспечить непрерывность бизнеса.

Современная защита строится на принципах глубокой защиты, сочетающей технические, организационные и человеческие факторы. Ключевыми элементами являются:

- внедрение модели нулевого доверия, где каждый запрос проверяется независимо от источника;
- использование систем анализа поведения пользователей и процессов для выявления аномалий;
- регулярное обучение сотрудников;
- применение технологий искусственного интеллекта для прогнозирования и предотвращения атак в реальном времени [1].

Особое внимание уделяется защите от инсайдерских угроз, через строгий контроль доступа, мониторинг действий и сегментацию сетей.

Развитие методов защиты связано с интеграцией AI и машинного обучения для создания систем безопасности, способных адаптироваться к новым угрозам. Активно исследуется применение блокчейна для обеспечения прозрачности критичных бизнес-процессов [2].

Эффективная защита бизнес-процессов требует не только внедрения передовых технологий, но и формирования культуры безопасности внутри организации. Комплексный подход позволяет значительно снизить риски и обеспечить устойчивое функционирование компании в условиях растущих киберугроз.

Литература

1. **Галатенко В.А.**, Основы информационной безопасности. — М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2021. — 450 с.
2. **Скляров Д.В., Тихонов А.И.**, Кибербезопасность и искусственный интеллект: современные вызовы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2023. — 320 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ C# ДЛЯ ОТЛАДКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ГРАФИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Современные научные и инженерные расчеты требуют не только корректной реализации математических моделей, но и эффективных методов их верификации. Визуализация данных и графиков является ключевым инструментом для проверки точности алгоритмов и анализа результатов. Язык программирования C# и библиотеки .NET предоставляет разработчику комплекс средств для построения графиков, пошаговой отладки вычислений и анализа данных.

Платформа .NET предлагает библиотеки LiveCharts, OxyPlot или ScottPlot для визуализации, которые интегрируются с Windows Forms и WPF. Это позволяет, в реальном времени, отслеживать влияние изменений параметров математической модели на итоговый график, что является основным методом визуальной отладки [1]. C# поддерживает интерактивную отладку с помощью IDE Visual Studio, включая точки останова, пошаговое выполнение и проверку значений переменных в ходе построения графика.

Для сложных вычислений, например, численных методов или обработки больших данных, эффективным подходом является модульное тестирование с использованием фреймворка NUnit или xUnit. Это позволяет автоматизировать проверку корректности отдельных математических функций до их интеграции в модуль визуализации.

Таким образом, применение C# и экосистемы .NET создает универсальную среду для быстрой и надежной отладки математического аппарата программ, сводя к минимуму ошибки на этапе разработки.

Литература

1. Троелсен Э., Джепикс Ф. Язык программирования C# 9.0 и платформа .NET 5. — М.: Диалектика, 2021. — 1056 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК ОСНОВА ЖИЗНИ РОБОТА

Робототехника в современном мире переживает трансформацию. Ключевым элементом этой трансформации выступает машинное обучение, становящееся «нервной системой» и «интеллектом» робота.

Традиционные подходы, основанные на детерминированных алгоритмах, демонстрируют низкую эффективность в условиях неопределенности и непредсказуемости реального мира. Предлагаемая концепция рассматривает машинное обучение как основу для трех фундаментальных функций робота: восприятие, планирование и управление.

Для обработки многомерных данных с сенсоров применяются глубокие нейронные сети, в частности сверточные и архитектуры, обеспечивающие распознавание объектов, навигацию и оценку состояния среды. Для планирования движений и принятия решений в реальном времени используются методы обучения с подкреплением, позволяющие роботу самостоятельно находить оптимальные стратегии поведения [1, 2].

Важным аспектом является разработка систем непрерывного обучения, обеспечивающих адаптацию робота к изменяющимся условиям и новым задачам без полного перепрограммирования. Это создает основу для появления полностью автономных систем, способных к долгосрочной эволюции в сложных средах.

Литература

1. **Воронцов К.В.**, Машинное обучение и искусственный интеллект для обработки текстов и анализа данных: учебный курс. — М.: МФТИ, 2021. — 367 с.
2. **Джон Б.** Конструируем роботов на Arduino. Первые шаги. — М.: БИНОМ, 2020. — 320 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В КОРПОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ

В условиях современной цифровой трансформации корпоративные информационные системы становятся критически важным активом и одновременно главной мишенью для кибератак. Обеспечение их безопасности выходит за рамки технических мер и превращается в комплексную стратегическую задачу, напрямую влияющую на непрерывность бизнеса, репутацию и финансовую стабильность организации.

Классические подходы, основанные на антивирусной защите, уже неэффективны против современных угроз, таких как целевые атаки и фишинг. Современная концепция информационной безопасности строится на принципах глубокоэшелонированной защиты, которая включает в себя организационные, технические и аспекты [1].

Ключевым трендом становится внедрение подходов основанные на риске, которые позволяют расставлять приоритеты рисков и распределять ресурсы на защиту наиболее критичных активов. Активно развиваются технологии прогнозной аналитики и машинного обучения для выявления аномалий и кибератак в режиме реального времени [2]. Внедрение моделей нулевого доверия, где доверие не предоставляется по умолчанию, позволяет минимизировать ущерб от скомпрометированных учетных записей.

Таким образом, эффективное обеспечение информационной безопасности требует интеграции передовых технологий и постоянного обучения персонала, формируя устойчивую киберустойчивость корпоративной системы.

Литература

1. **Галатенко В.А.**, Основы информационной безопасности. — М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2021. — 450 с.
2. **Скляр Д.В., Тихонов А.И.**, Кибербезопасность и искусственный интеллект: современные вызовы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2023. — 320 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

В современных условиях требования к скорости и эффективности логистических процессов оптимизации маршрутов доставки становятся ключевым фактором снижения затрат и повышения качества обслуживания. Классические методы планирования часто не справляются с объемными данными и множеством ограничений, что приводит к нерациональному использованию ресурсов.

Современные методы оптимизации, такие как задача маршрутизации транспортных средств (Vehicle Routing Problem) и её модификации (например, Vehicle Routing Problem с временными окнами — Vehicle Routing Problem with Time Windows), позволяют учитывать множество параметров: пропускную способность, временные интервалы, приоритеты доставки. Для решения этих задач применяются как точные методы (метод ветвей и границ), так и метаэвристические алгоритмы. Использование таких подходов позволяет сократить длину маршрутов, время доставки и расход топлива.

Внедрение искусственного интеллекта и машинного обучения, с классическими методами оптимизации, открывает новые возможности для динамической маршрутизации в режиме реального времени с учётом непостоянных условий: пробки, погода [2]. Развитие квантовых вычислительных систем в будущем может помочь решить сложные логистические задачи практически мгновенно.

Применение advanced-методов оптимизации в логистике не только повышает экономическую эффективность, но и способствует устойчивому развитию.

Литература

1. **Тот П., Вайго Д.**, Задача маршрутизации транспортных средств: методы и приложения. — М.: Бином, 2019. — 300 с.
2. **Гудвин П., Старр Р.**, Искусственный интеллект в логистике и управлении цепями поставок. — СПб.: Питер, 2022. — 254 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ПРАВИЛЬНОСТЬ НАПИСАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОДА

Разработка программного обеспечения предъявляет высокие требования к надежности и безопасности. Ошибки, допущенные на этапе написания, могут привести к значительным финансовым потерям, уязвимостям в системе безопасности и критическим сбоям в работе ответственных систем. Традиционные методы отладки, такие как ручное тестирование, зачастую оказываются трудоемкими и не способны выявить все потенциальные дефекты, особенно в крупных и сложных проектах.

Современные методы и инструменты статического и динамического анализа предоставляют возможности для существенного повышения качества кода. Интеграция процессов автоматизированного тестирования позволяет создать устойчивую к ошибкам среду разработки.

Автоматизация контроля качества обеспечивает раннее выявление ошибок и уязвимостей. Методология повышает надежность итогового продукта и способствует формированию единых стандартов кодирования в команде. Однако, внедрению могут мешать необходимость дополнительного обучения команды и первоначальные затраты времени на настройку инструментов и написание тестов [1].

Применение современных методологий для обеспечения правильности написания кода переводит процесс разработки на новый уровень. Данный подход значительно снижает количество дефектов, что является критически важным фактором для создания сложного, надежного и безопасного программного обеспечения. Несмотря на существующие проблемы, связанные с разнообразием технологических стеков, развитие инструментов статического анализа и формальных методов верификации позволяет успешно с ними справляться, делая качественный.

Литература

1. **Мартин Р.** Чистый код: создание, анализ и рефакторинг. Библиотека программиста. — СПб.: Питер, 2025. — 464 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ C++ ДЛЯ СОЗДАНИЯ РОБОТОВ НА БАЗЕ RASPBERRY PI

Современная робототехника требует высокие требования к быстродействию систем управления, времени отклика и эффективному использованию вычислительных ресурсов. Микрокомпьютеры, такие как Raspberry Pi, получили широкое распространение в качестве управляющего ядра робототехнических комплексов благодаря своей мощности, наличию периферийных интерфейсов GPIO, I²C и SPI. Однако для реализации сложных алгоритмов, таких как одновременная локализация и картографирование, планирование траектории в реальном времени и обработка видео с камеры, необходим язык программирования, обеспечивающий полный контроль над аппаратными ресурсами [1].

Язык C++ предоставляет огромные возможности для решения этих задач. Его ключевым преимуществом является производительность, благодаря отсутствию виртуальной машины и сборщика мусора, а также прямой доступ к памяти и периферии через низкоуровневые API. Это позволяет создавать отзывчивые и надежные системы.

Использование C++ обеспечивает создание высокоскоростных и точных систем управления. Разработчик получает полный контроль над всеми процессами, а созданное программное обеспечение обладает высокой переносимостью.

Применение C++ для программирования роботов на базе Raspberry Pi позволяет создавать высокопроизводительные и надежные автономные системы. Данный подход не только раскрывает весь аппаратный потенциал платформы, но и обеспечивает детерминированное выполнение алгоритмов, что является ключевым фактором для промышленной и исследовательской робототехники. Сочетание библиотек компьютерного зрения, робототехнических фреймворков и низкоуровневых библиотек делает связку Raspberry Pi и C++ одним из наиболее эффективных решений для создания нового поколения интеллектуальных роботов.

Литература

1. **Бромбах Л.**, Практическая робототехника. C++ и Raspberry Pi. — СПб.: BHV-СПб, 2023. — 448 с.

А.Н. Кошелев, студ.; рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПРЕПОДАВАНИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Современное образование в области программирования сталкивается с вызовами, связанными с необходимостью персонализации обучения и оперативной обратной связи для студентов. Традиционные методы преподавания часто оказываются недостаточно эффективными при работе с разнородной аудиторией, имеющей различный уровень подготовки и когнитивные особенности [1].

Предлагаемый подход предполагает использование методов машинного обучения для анализа исходного кода, написанного студентами для автоматической оценки качества. В основе системы лежит обработка естественного языка с использованием специализированных моделей, которые адаптированы для анализа программного кода.

Для персонализации образовательной траектории применяются алгоритмы кластеризации студентов на основе анализа их прогресса и типичных ошибок. Важный аспект, это разработка интеллектуальной системы рекомендаций, предлагающей индивидуальные задания и учебные материалы с учетом выявленных пробелов в знаниях.

Литература

1. **Воронцов К.В.**, Машинное обучение и искусственный интеллект для обработки текстов и анализа данных: учебный курс. — М.: МФТИ, 2021. — 367 с.

*А.А. Беспалов, студ.; М.А. Миронов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В РОССИЙСКОМ БАНКИНГЕ

Последние 3 года российские айти-компании отказываются от иностранного программного обеспечения (далее ПО) и переходят на отечественное или свободно распространяемое ПО. Для многих компаний переход является лишь рекомендацией, но существуют сферы (в частности, финансовая), в которых переход на такое ПО является указанием к действию [1].

При реализации импортозамещения банки сталкиваются с огромными сложностями, связанными с тем, что из-за ухода корпорации Oracle на рынке баз данных не остается компании, которая может предложить сопоставимые вычислительные мощности. Российским банкам приходится самостоятельно искать пути оптимизации своих бизнес-процессов, минимально затрагивая пользовательский опыт своих клиентов. Для предоставления тех же услуг на новом программном обеспечении многие компании заменяют синхронную архитектуру производимых операций на асинхронный подход, а также у российских банков появляется стимул для анализа legacy-кода и его дальнейшего рефакторинга.

С переходом на новые системы пользовательский опыт, вероятно, ухудшится в краткосрочной перспективе из-за ошибок в новом ПО, но в дальнейшем такой переход скажется в лучшую сторону на надежности банковских систем (из-за асинхронного подхода) и позволит бизнесу дешевле масштабировать свои проекты.

Литература

1. ЦБ РФ определил порядок осуществления контроля за соблюдением банками реализации планов мероприятий по переходу на преимущественное использование российского ПО и отечественного оборудования // Элкод URL: https://elcode.ru/service/news/nn_subscribe_themetype_bank/cb-rf-opredelil-poryadok-osushchestvleniya-kontrol (дата обращения: 10.10.2025).

*Т.Е. Луговая, студ.; А.А. Беспалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ

Начиная с 2000-х годов при написании корпоративных приложений стал популярен подход MVC (Model View Controller) для языка C# и его аналог RSC (Repository Service Controller) подход для таких языков как Java, Go, Scala и других. Данный подход заключается в разделении приложения на три слоя: слой работы с данными (де-факто работу с базой данных), слой бизнес-логики и слой контроллер (или веб-слой, если речь про веб-приложение) [1].

Повсеместное обучение и применение данного паттерна, по задумке, должно было помочь разработчикам распределить зону ответственности между компонентами программы. На деле, данный паттерн, как и любой другой, следует применять при возникновении такой необходимости, в противном случае простые приложения усложняются выделением множества слоев, в которых нет никакой функции. Паттерн, который создавался для упрощения чтения кода и его понимания, фактически стал причиной того, что программный код мелких и средних проектов стал менее читаемым и усложнился в понимании для новых разработчиков, вследствие чего неправильные предпосылки для разъединения структуры приложения превращаются в неправильное использование слоев самими разработчиками.

Многие паттерны являются, безусловно, золотым стандартном проектирования, но очень часто при их применении архитекторы не учитывают те факторы, при наличии которых паттерн должен быть реализован. Приложения наделяются множеством компонентов «пустышек» для формального соответствия паттерну, который не решает проблемы проекта, потому что проект не находится на той стадии, когда следует провести его рефакторинг.

Литература

1. **Эванс, Э.** Предметно-ориентированное проектирование (DDD). Структуризация сложных программных систем. М.: Вильямс, 2010.

*И.Д. Рябов, студ.; Т.Е. Луговая, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ MOBILENETV2 ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В современных прикладных задачах компьютерного зрения всё чаще возникает необходимость разработки моделей, сочетающих высокую точность с низкими вычислительными затратами. Для решения подобных задач широко применяется подход трансферного обучения, при котором предобученная на крупном наборе данных сверточная нейронная сеть адаптируется под новую предметную область. При этом выбор базовой архитектуры играет ключевую роль [1]. В предстоящей работе в качестве основы было принято решение использовать модель MobileNetV2 — компактную, но эффективную архитектуру, разработанную Google в 2018 году.

MobileNetV2 отличается использованием инвертированных остаточных блоков и глубинно-разделяемых свёрток, что позволяет значительно сократить количество параметров и операций умножения-сложения без существенной потери в точности. Благодаря этому модель демонстрирует высокую производительность даже на устройствах с ограниченными ресурсами — смартфонах, одноплатных компьютерах и embedded-системах. В реализации модели применяется двух-этапная стратегия обучения: на первом этапе замораживается сверточная основа, и обучается только добавленная «голова» классификации; на втором — проводится точная настройка (fine-tuning) последних слоёв с низкой скоростью обучения, что позволяет адаптировать высокоуровневые признаки под специфику задачи. Дополнительно используются аугментация данных и регуляризация, что повышает устойчивость модели к переобучению.

Таким образом, выбор MobileNetV2 обоснован не только техническими характеристиками архитектуры, но и практическими соображениями применимости, эффективности и масштабируемости.

Литература

1. **Сикорский О.С.** Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений — Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. № 20.

*Т.Е. Луговая, студ.; И.Д. Рябов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ОБЗОР ИНСТРУМЕНТА ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ TEACHABLE MACHINE ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При использовании сверточных нейронных сетей один из самых трудоемких этапов классификации — обучение модели. Teachable Machine — это веб-инструмент, разработанный Google, предназначенный для быстрого прототипирования и обучения моделей машинного обучения без необходимости написания кода.

Для обучения модели с помощью инструмента необходимо создать классы и загрузить изображения обучающей выборки для каждого из них. Поддерживается функционал настройки гиперпараметров модели: количество эпох, размера пакета и скорости обучения. В рамках веб-версии возможна проверка модели после обучения — результат классификации отображается для каждого нового загруженного примера, однако традиционные численные метрики ошибок (F1-мера, полнота, точность) не поддерживаются, модель отображает вероятность принадлежности конкретного примера к каждому классу в процентах [1].

Экспорт обученных моделей для дальнейшего использования доступен в формате TensorFlow.js. Их можно использовать везде, где поддерживается javascript, поэтому они отлично сочетаются с такими инструментами, как Glitch, P5.js, Node.js и не только. С помощью tfjs-конвертера возможность применения расширяется и на другие языки программирования, в т.ч. на Python, распространенный для работы с большими данными. В рамках дальнейшей работы с моделью возможно проведение оценки ее точности на тестовой выборке и использование в рабочих задачах при достаточных показателях.

Teachable Machine ориентирован на пользователей без технической подготовки, но эффективен для образовательных целей, быстрого тестирования гипотез и создания прототипов решений.

Литература

1. **Просиз Дж.** Прикладное машинное обучение и искусственный интеллект для инженеров. — Астана: Алист, 2024.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ RPA-РОБОТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЧЕТОВ-ФАКТУР В МАЛОМ БИЗНЕСЕ

Автоматизация рутинных операций в малом бизнесе становится ключевым фактором повышения операционной эффективности, особенно в условиях ограниченности ресурсов и высокой конкуренции. Одной из наиболее трудоемких задач является обработка счетов-фактур, требующая значительных временных затрат и подверженная рискам человеческих ошибок. Внедрение роботизированной автоматизации процессов (RPA) позволяет существенно сократить издержки и повысить точность выполнения операций.

Предлагаемая методика оценки экономического эффекта включает сравнение затрат до и после внедрения RPA-решения. Учитываются такие параметры, как время обработки одного документа, количество сотрудников, задействованных в процессе, частота ошибок и стоимость их исправления. Расчет прямого экономического эффекта основан на снижении трудозатрат и уменьшении операционных рисков [1].

Для учета косвенных benefits применяется анализ повышения скорости закрытия операционных циклов и улучшения управляемости бизнес-процессами. Важным аспектом методики является адаптация под специфику малого бизнеса, включая низкий порог входных инвестиций и короткий срок окупаемости.

Литература

1. **Томас Д.** Внедрение искусственного интеллекта в бизнес-практику: Преимущества и сложности. — М.: Альпина Паблишер, 2020. — 316 с.

К.С. Карпачева; рук. Н.Ю. Румасова, асс. (НИУ «МЭИ»)

ETL-ПРОЦЕСС КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ АКТУАЛЬНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ В СБАЛАНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Современные системы управления, основанные на сбалансированной системе показателей (BSC), критически зависят от достоверных данных для расчета ключевых показателей эффективности (KPI). Но исходные данные часто фрагментированы по множеству систем, вроде ERP и CRM, имеют различные форматы и содержат ошибки. Одним из методов автоматизации процесса актуализации и нормализации данных является применение ETL-методов [1].

ETL-процесс (Extract, Transform, Load) представляет собой метод автоматизированного извлечения, преобразования и загрузки данных. В контексте BSC ETL-процесс является основным каналом поставки данных. В ходе него автоматически собирается информация из операционных систем (ERP, CRM), преобразуется и загружает их в специализированную базу или систему управления эффективностью, где происходит их последующий анализ и визуализация в рамках BSC. Концепция ETL основана на трех последовательных этапах [1]:

1. Извлечение — автоматическое получение данных из различных исходных систем-источников.
2. Преобразование — ключевой этап верификации, включающий очистку данных от дубликатов и ошибок, стандартизацию форматов, агрегацию и обогащение в соответствии с бизнес-правилами, необходимыми для корректного расчета KPI в BSC.
3. Загрузка — помещение преобразованных и проверенных данных в целевую базу данных или хранилище, оптимизированное для построения отчетов и стратегических карт BSC.

Главное преимущество использования ETL для BSC — это автоматическое преобразование сырых операционных данных в структурированную стратегическую информацию, что позволяет руководству видеть реальную картину бизнеса в режиме, близком к реальному времени. ETL-процесс ликвидирует задержки, минимизирует ручной труд и человеческий фактор, обеспечивая тем самым актуальность и достоверность данных в BSC. ETL-процесс является основой для построения BSC в средних и крупных компаниях любого профиля, где управление основано на данных.

Литература

1. Кузьмина Ю.В., Кубанских О.В. Краткое описание процесса ETL // Ученые записки Брянского университета. — Брянск: Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, 2017. — С. 33–36.

*Т.Е. Луговая, студ.; А.А. Беспалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРЕДИТОСПОСОБНОСТИ КЛИЕНТОВ БАНКА ПРИ ВЫДАЧЕ КРЕДИТОВ

Метод деревьев решений (decision trees) — один из наиболее популярных методов решения задач классификации и прогнозирования. Деревья решений успешно применяются для решения практических задач в области банковского дела, в том числе для оценки кредитоспособности клиентов при выдаче кредита.

Ранее для оценки потенциальных заемщиков преимущественно использовались скоринг-системы, основной недостаток которых — плохая адаптируемость. Одной из альтернатив становятся методы Data Mining, в частности деревья решений. Применяется алгоритм CART (Classification and Regression Tree), критерием расщепления которого является индекс Gini. В контексте решения задачи оценки кредитоспособности для создания дерева в простейшем случае используются следующие данные: возраст, уровень дохода, срок кредитования, наличие кредитов. Набор характеристик может быть расширен для более точной идентификации клиента и повышения точности прогнозирования. Важной особенностью алгоритма является запись правил, определяющих принадлежность потенциального заемщика к той или иной группе, на естественном языке (например, ЕСЛИ Возраст > 35 = Нет И Есть ли недвижимость = Да И Образование = Высшее И Наличие банковского счета = Да, ТО Выдать кредит = Да) [1].

Таким образом, применение деревьев решений представляет собой перспективный подход к оценке кредитоспособности клиентов банка, минимизируя стоимость адаптации решения в конкретной организации и обеспечивая прозрачность принятия решений.

Литература

1. Султанова К.Т. Методика кредитного скоринга в оценке финансового положения потенциального заемщика // Педагогическая наука и практика. — 2020. — № 1 (27). — С. 69–74.

*И.Д. Рябов, студ.; А.А. Беспалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

АУГМЕНТАЦИЯ ДАННЫХ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ОБОБЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одной из центральных проблем классификации изображений является переобучение моделей глубокого обучения. В этих условиях аугментация данных — искусственное расширение обучающей выборки с помощью допустимых геометрических и фотометрических преобразований — становится необходимым элементом обучения, а не просто вспомогательным приёмом.

Метод создаёт новые, семантически корректные примеры, имитируя естественные вариации объектов: изменения ракурса, масштаба, освещения и положения в кадре. Это повышает разнообразие данных без дополнительной разметки и особенно эффективно при дефиците обучающих изображений. Типичные трансформации включают повороты, сдвиги, масштабирование, горизонтальное отражение, а также коррекции яркости и контраста [1]. Ключевое требование к выбору преобразований — сохранение метки класса: например, горизонтальное отражение допустимо для симметричных объектов, например, лица, автомобили, музыкальные инструменты, но недопустимо для текста или аэрофотосъёмки.

Эксперименты показывают, что аугментация снижает разрыв между точностью на обучающей и валидационной выборках и повышает устойчивость модели к шуму и нестандартным условиям. Однако её эффективность зависит от предметной области: слепое применение всех трансформаций может привести к генерации нереалистичных изображений и ухудшению качества обучения. Поэтому стратегия аугментации должна быть обоснована физикой объекта и условиями его реального использования.

Литература

1. **Порывай М.В.** Сравнительное исследование методов естественной аугментации изображений // International Journal of Open Information Technologies. 2024. № 10.

А.А. Стифеева, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ БИЗНЕС-АНАЛИТИКА НА ПРЕДПРИЯТИЕ

В современных условиях цифровой трансформации и усиления глобальной конкуренции российские предприятия сталкиваются с необходимостью пересмотра подходов к управлению операционной деятельностью. Особую актуальность приобретает проблема эффективного использования данных для принятия стратегических решений, где традиционные методы управления являются ограниченными. Отсутствие системного подхода к бизнес-анализу приводит к значительным финансовым потерям, неэффективному использованию ресурсов и упущенным возможностям для развития.

Современный бизнес-анализ предлагает новые подходы к оценке эффективности деятельности предприятия. В отличие от традиционных методов управления, современные методики бизнес-анализа позволяют интегрировать различные аспекты деятельности компании — операционную эффективность, управление рисками, коммуникационные процессы и стратегическое развитие. Это обеспечивает комплексный подход к оценке вклада бизнес-аналитика в повышение эффективности компании.

Особенностью современного подхода является разработка системы показателей, позволяющих оценивать эффективность бизнес-анализа. Создаются методики расчета возврата на инвестиции в бизнес-анализ, включающие сравнительный анализ эффективности проектов с участием бизнес-аналитика и без его участия. Разрабатываются системы ключевых показателей, учитывающие успешность внедрения проектов, уровень рекламаций, удовлетворенность заинтересованных сторон и оптимизацию операционных затрат.

Внедрение современных подходов к бизнес-анализу повышает эффективность управления. Комплексная оценка влияния аналитика формирует основу для отраслевых стандартов. Особенно перспективна разработка специализированных решений и систем для сбора и анализа показателей, что позволит масштабировать лучшие методики на предприятия любого уровня и оптимизировать бизнес-процессы.

Литература

1. ИВА. Руководство к своду знаний по бизнес-анализу (BABOK). — 3-е изд. — 2015.

А.А. Стифеева, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ КОЛИЧЕСТВА КЛИЕНТОВ В БИЗНЕСЕ

Предприятия активно применяют машинное обучение для прогнозирования спроса. Алгоритмы анализируют комплекс факторов: исторические продажи, сезонность и экономические показатели. В отличие от традиционной статистики, машинное обучение обрабатывает разнородные данные в реальном времени.

Методология использует регрессионные модели и алгоритмы классификации, адаптированные под бизнес-задачи. Метод опорных векторов выявляет нелинейные зависимости между маркетингом и откликом клиентов, а рекуррентные сети прогнозируют временные ряды с учетом сезонности. Деревья решений и градиентный бустинг анализируют множество взаимосвязанных параметров — от погоды до цен конкурентов.

Ключевое преимущество — способность моделей к непрерывному обучению. Система динамически обновляет весовые коэффициенты при поступлении новых данных через механизмы онлайн-обучения, что особенно ценно в условиях изменчивого рынка.

Для интеграции метода в бизнес-процессы создаются специализированные программные решения, часто в формате облачных сервисов. Эти системы объединяют этапы сбора данных, их предобработки, обучения моделей и визуализации результатов. Важным компонентом становится разработка интерфейсов для взаимодействия с корпоративными CRM и ERP-системами, что обеспечивает беспрепятственное использование прогнозов в операционной деятельности.

Перспективы развития метода связаны с интеграцией более сложных архитектур нейронных сетей, включая трансформеры для анализа текстовых отзывов и механизмов внимания для выделения наиболее значимых факторов в условиях ограниченных данных. Особый потенциал представляет сочетание методов машинного обучения с технологиями объяснимого искусственного интеллекта, что повысит доверие бизнес-пользователей к результатам прогнозирования.

Литература

1. **Барский А.Б.** «Машинное обучение в маркетинге и CRM» СПб.: БХВ-Петербург, 2021. — 336 с.

А.А. Стифеева, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

РЕИНЖИНИРИНГ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ СКЛАДСКОГО УЧЕТА

В условиях цифровой трансформации и роста логистических издержек российские предприятия сталкиваются с необходимостью кардинального пересмотра подходов к организации складского учета. Особую актуальность приобретает проблема оптимизации складских операций, где традиционные методы управления демонстрируют свою неэффективность в условиях растущих требований к скорости обработки заказов и точности учета товарных запасов.

Современный реинжиниринг складского учета предполагает комплексное преобразование всех аспектов деятельности. В отличие от частичной оптимизации, модель ориентирована на сквозную реорганизацию — от приемки до отгрузки товара. Особое внимание уделяется внедрению автоматизированной идентификации, пересмотру зонирования помещений и оптимизации маршрутов перемещения.

Ключевым элементом преобразований становится внедрение современных технологий. Использование мобильных сканеров штрих-кодов, RFID-меток и платформ управления складскими операциями повышает точность и скорость процессов. Интеграция складской системы с ERP обеспечивает прозрачность товарных потоков и своевременное обновление данных о запасах.

Особенностью подхода является разработка системы показателей эффективности. Внедрение метрик контроля оборачиваемости товаров, точности инвентаризации и производительности операций позволяет объективно оценивать результаты оптимизации и своевременно корректировать процессы.

Перспективы развития связаны с внедрением интернета вещей и предиктивной аналитики. Системы прогнозирования спроса и интеллектуального управления запасами оптимизируют использование мощностей и сократят издержки. Адаптивные алгоритмы зонирования и маршрутизации повысят эффективность логистики в изменяющихся рыночных условиях.

Литература

1. **Иванов А.В.** «Современные технологии складской логистики». — М.: Инфра-М, 2022. — 312 с.

А.А. Стифеева, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

В условиях цифровой трансформации и роста конкуренции на рынке электронной коммерции перед компаниями остро стоит задача повышения эффективности систем рекомендаций. Традиционные алгоритмы, основанные на коллаборативной фильтрации и анализе схожести товаров, демонстрируют ограниченность в условиях большого ассортимента и разнообразия пользовательских предпочтений. Особую актуальность приобретает проблема создания персонализированных рекомендаций, учитывающих не только историю покупок, но и контекст взаимодействия пользователя с платформой.

Современные системы рекомендаций используют большие языковые модели (LLM) для анализа разнородных пользовательских данных. В отличие от традиционных методов, LLM обрабатывают неструктурированные данные: описания товаров, отзывы, историю запросов. Это позволяет выявлять семантические связи между товарами и предпочтениями пользователей.

Особенность LLM — генерация персонализированных рекомендаций на основе анализа естественного языка. Модели учитывают тонкие нюансы предпочтений из текстовых отзывов и адаптируют стиль рекомендаций под индивидуальные особенности каждого пользователя.

Ключевым преимуществом подхода является возможность постоянного обучения моделей на новых данных. Система динамически обновляет представления о предпочтениях пользователей по мере поступления новой информации, что особенно важно в условиях быстро меняющегося ассортимента и пользовательских интересов.

Перспективы развития систем рекомендаций на основе LLM связаны с интеграцией мультимодальных данных, включая анализ изображений товаров и пользовательского контента. Совершенствование методов интерпретации рекомендаций позволит повысить доверие пользователей к системе. Особый потенциал представляет разработка адаптивных интерфейсов, способных динамически менять стратегию рекомендаций в зависимости от контекста и поведения пользователя.

Литература

1. **Васильев И.С.** «Большие языковые модели в бизнесе». — М.: ДМК Пресс, 2023. — 256 с.

А.А. Стифеева, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

БИЗНЕС-АНАЛИТИК В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА: ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЭКОНОМИИ РЕСУРСОВ

В условиях экономической нестабильности российские предприятия столкнулись с ростом затрат, ограничением доступа к технологиям и необходимостью сохранения операционной эффективности. Проблема оптимизации бизнес-процессов превратилась из инструмента постепенного улучшения в критический фактор выживания.

Исследование демонстрирует новый подход к роли бизнес-аналитика в кризисных условиях. В отличие от традиционного восприятия, предлагаемая модель ориентирована на оперативное антикризисное управление. Особый потенциал имеют методы стоимостного анализа и картирования потоков создания ценности для экстренной реструктуризации процессов с акцентом на немедленное снижение издержек.

Предполагается разработка методики экспресс-диагностики бизнес-процессов для оперативного выявления критических точек неэффективности. Методика будет апробирована на производственном предприятии с анализом цепочки поставок. Ожидаемые результаты внедрения включают сокращение операционных затрат на 15% в течение квартала и высвобождение до 20% рабочего времени специалистов.

Методика позволит систематизировать процесс выявления узких мест и разработать механизм их оперативной оптимизации. Создаваемый инструментарий будет универсальным для предприятий различных отраслей и масштабов.

Разработанный подход обладает потенциалом для внедрения в наиболее пострадавших от санкций отраслях. Перспективы включают адаптацию для сферы услуг и государственных предприятий, а также создание программного решения для автоматизированной диагностики бизнес-процессов.

Литература

1. **Ларсон Э., Лэфли Р.** Бизнес-анализ: практическое руководство по внедрению изменений. — М.: Юрайт, 2021. — 318 с.

И.Е. Дежуков, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В условиях цифровизации экономики машинное обучение и искусственный интеллект становятся ключевыми инструментами повышения эффективности бизнеса. Их применение выходит за рамки автоматизации рутинных операций, затрагивая основы управления и стратегического планирования. Интеллектуальные системы позволяют перейти к проактивной оптимизации процессов на основе прогнозных моделей и анализа больших данных, что особенно актуально в условиях высокой волатильности рынков [1].

Современный этап развития характеризуется переходом от изолированных решений к комплексной трансформации бизнес-процессов. Сегодня потенциал ИИ раскрывается в создании сложных прогнозных систем, способных не только предсказывать спрос, но и моделировать долгосрочные последствия стратегических решений, выявляя скрытые взаимосвязи. Это позволяет компаниям не только реагировать на изменения, но и формировать будущие рыночные тренды.

Особую ценность представляет многоуровневый подход к интеграции интеллектуальных систем. На начальном этапе технологии обеспечивают операционную эффективность через автоматизацию задач. Следующий уровень подразумевает тактическую оптимизацию — перестройку процессов управления запасами и персонализацию маркетинга. Наиболее зрелые внедрения позволяют выйти на стратегический уровень, когда алгоритмы участвуют в формировании сценарных прогнозов развития бизнеса, обеспечивая адаптивность к меняющимся условиям.

Дальнейшее развитие открывает перспективы для различных отраслей экономики. Интеграция ИИ с Интернетом вещей создает предпосылки для автономных систем управления производственными процессами. Особый интерес представляет применение когнитивных технологий для анализа неструктурированных данных, что расширяет возможности прогнозирования. Компании, способные преодолеть барьеры внедрения и системно интегрировать технологии, получают устойчивое конкурентное преимущество в экономике, основанной на данных.

Литература

1. **Шолле Ф.** — «Глубокое обучение на Python» — СПб.: Питер, 2022.

И.Е. Дежуков, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ AGILE-МАНИФЕСТА В СОВРЕМЕННЫХ КОМПАНИЯХ: ОТ IT-РАЗРАБОТКИ К УПРАВЛЕНИЮ БИЗНЕСОМ

В современной бизнес-среде, характеризующейся высокой волатильностью и быстро меняющимися потребностями клиентов, все более актуальным становится применение гибких подходов к управлению. Манифест Agile, изначально созданный для разработки программного обеспечения, демонстрирует свою эффективность в различных сферах бизнеса — от маркетинга до стратегического управления [1].

Особую ценность представляет адаптация базовых принципов Agile под специфику традиционных компаний. Внедрение итеративного подхода и коротких циклов планирования позволяет организациям оперативно реагировать на изменения рынка. Например, использование Scrum-методологии в банковском секторе помогло сократить время вывода новых продуктов на 40%, а регулярные ретроспективы значительно повысили качество взаимодействия между подразделениями.

Ключевым преимуществом Agile становится фокус на ценности для клиента. Принцип «люди и взаимодействие важнее процессов и инструментов» особенно важен в условиях цифровой трансформации, где успех проекта часто зависит от слаженной работы кросс-функциональных команд. На практике это означает перестройку системы KPI и внедрение гибких моделей управления производительностью.

Перспективы развития Agile связаны с его интеграцией с другими управленческими методиками. Гибридные модели, сочетающие Agile с элементами классического проектного управления, позволяют сохранить преимущества обоих подходов. Особый интерес представляет применение Agile-принципов в корпоративной стратегии, где короткие циклы планирования и регулярная адаптация планов помогают компаниям оставаться конкурентоспособными в условиях неопределенности.

Литература

1. Сазерленд Д. Scrum: революционный метод управления проектами. — М.: Альпина Паблишер, 2022.

И.Е. Дежуков, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

БИЗНЕС-АНАЛИЗ ДЛЯ AI-ПРОЕКТОВ: ОСОБЕННОСТИ СБОРА ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ С МАШИНЫМ ОБУЧЕНИЕМ

В эпоху цифровой трансформации проекты с искусственным интеллектом перестали быть экзотикой и перешли в разряд стратегических инициатив для многих компаний. Однако традиционные подходы к сбору требований часто оказываются неэффективными при работе с AI-системами, где результат работы алгоритма невозможно точно спрогнозировать на этапе проектирования. Это создает серьезные риски для бизнеса — от неоправданных инвестиций до репутационных потерь[1].

Особенность современных AI-проектов заключается в необходимости управления ожиданиями стейкхолдеров. В отличие от классических IT-систем, где требования носят детерминированный характер, в машинном обучении ключевое значение приобретает работа с вероятностными результатами. Новизна подхода заключается в разработке итеративных процессов валидации требований, где каждый цикл обучения модели уточняет и корректирует исходные бизнес-предположения.

Существенный вклад в развитие методологии бизнес-анализа для AI-проектов вносит адаптация техник спецификации требований. Предлагается использовать расширенные форматы пользовательских историй с обязательным указанием метрик качества модели, допустимых границ ошибок и сценариев обработки некорректных предсказаний. Важным аспектом становится внедрение практик кросс-функционального сотрудничества между бизнес-аналитиками и data scientists.

Перспективы развития бизнес-анализа в AI-проектах связаны с интеграцией специализированных инструментов управления требованиями, поддерживающих версионирование наборов данных и метрик качества моделей. Особую ценность представляет разработка стандартизированных фреймворков документирования требований к AI-системам, которые смогут унифицировать процессы взаимодействия между бизнес-заказчиками и техническими специалистами. Компании, успешно освоившие эти подходы, получают значительное преимущество в реализации сложных AI-проектов с измеримым бизнес-эффектом.

Литература

1. **Битти Д., Вигерс К.** — «Разработка требований к программному обеспечению» — 3-е изд. — СПб.: БХВ, 2019.

И.Е. Дежуков, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ: РОЛЬ СИСТЕМНОГО АНАЛИТИКА НА ВСЕХ ЭТАПАХ

Современные компании сталкиваются с растущей сложностью управления ИТ-инфраструктурой, где одновременное обслуживание множества систем требует новых подходов к организации их жизненного цикла. Особую актуальность приобретает вопрос обеспечения непрерывности бизнес-процессов при постоянной эволюции технологических платформ и пользовательских требований [1].

Исследования демонстрируют переход к сквозному участию системного аналитика на всех стадиях существования системы — от концептуального проектирования до поэтапного вывода из эксплуатации. Такой подход обеспечивает сохранение архитектурной целостности и соответствия системы изменяющимся бизнес-потребностям на протяжении всего периода ее использования.

Разработанная методика сопровождения систем основана на принципах непрерывного анализа и адаптации требований. Особое внимание уделяется созданию унифицированных шаблонов документации, обеспечивающих эффективную передачу знаний между различными специалистами. Практическая реализация этого подхода демонстрирует значительное сокращение затрат на поддержку и модернизацию систем.

Дальнейшее развитие управления жизненным циклом связано с интеграцией специализированных платформ, поддерживающих сквозное отслеживание изменений требований. Перспективным направлением представляется сочетание методики с практиками DevOps и автоматизированного тестирования. Такой подход не только повышает окупаемость инвестиций в ИТ, но и создает основу для устойчивого развития цифровой инфраструктуры в долгосрочной перспективе.

Литература

1. **Коберну, А.:** «Современные методы описания функциональных требований к системам». — М.: «Лори», 2022.

И.Е. Дежуков, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ IT-БЕЗОПАСНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНОЙ РАБОТЫ СОТРУДНИКОВ

Переход к гибриднему формату работы, объединяющему офисные и удаленные режимы, создал принципиально новые вызовы для систем корпоративной безопасности. Традиционные модели, ориентированные на защиту периметра сети, утрачивают эффективность, когда сотрудники подключаются к корпоративным ресурсам из различных локаций через неподконтрольные компании каналы связи. Актуальность проблемы усиливается ростом изощренных кибератак именно на удаленные рабочие места сотрудников [1].

Современные подходы к безопасности смещаются в сторону модели Zero Trust, которая предполагает постоянную проверку подлинности и авторизацию каждого запроса к корпоративным системам независимо от местоположения пользователя. Особое значение приобретает реализация строгого контроля доступа на основе принципа наименьших привилегий и многофакторной аутентификации. Эти меры дополняются средствами защиты конечных точек, включая обязательное шифрование данных на устройствах сотрудников.

Эффективность предлагаемых решений демонстрирует опыт компаний, внедривших Secure Access Service Edge платформы, которые централизованно обеспечивают безопасный доступ к корпоративным приложениям. Дополнительный уровень защиты создается за счет регулярного обучения сотрудников, поскольку человеческий фактор остается одним из основных векторов атак в гибридной среде.

Перспективы развития управления IT-безопасностью связаны с интеграцией технологий искусственного интеллекта для оперативного выявления аномальной активности и автоматического реагирования на инциденты. Комплексный подход, сочетающий технологические решения с повышением киберграмотности персонала, позволяет организациям не только противостоять текущим угрозам, но и адаптироваться к будущим вызовам цифровой среды.

Литература

1. **Бирюков А.:** «Информационная безопасность: защита и нападение». — ДМК Пресс, 2022.

*М.А. Миронов, студ.; А.А. Беспалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ XML LAYOUT И JETPACK COMPOSE В ANDROID-РАЗРАБОТКЕ

В Android-разработке сегодня существуют два основных подхода к созданию пользовательских интерфейсов: традиционный XML и современный Jetpack Compose.

XML — это традиционное решение, использующее императивный подход. Разработчик описывает структуру интерфейса в XML-файлах, а затем управляет элементами через код Activity или Fragment, используя методы findViewById. Этот подход имеет обширную базу готовых решений, но требует большого количества шаблонного кода [1].

Jetpack Compose представляет собой современный декларативный фреймворк, где весь интерфейс описывается функциями на Kotlin. Вместо ручного управления элементами UI разработчик определяет, как должен выглядеть интерфейс в зависимости от текущего состояния.

В плане производительности оба подхода демонстрируют хорошие результаты, однако Compose использует интеллектуальную систему рекомпозиции, которая перерисовывает только измененные элементы [2].

Важным преимуществом Compose является встроенная работа с состоянием, где изменения данных автоматически отражаются на интерфейсе. В XML управление состоянием требует дополнительных усилий через LiveData, StateFlow или другие механизмы.

Выбор между подходами зависит от конкретных задач. XML остается надежным выбором для поддержки legacy-проектов. Jetpack Compose становится оптимальным решением для новых проектов, позволяя быстрее создавать и поддерживать код с помощью современных декларативных принципов.

Литература

1. **Филлипс Б., Стюарт К., Марсикано К., Гарднер Б.** Android. Программирование для профессионалов, 5-е издание. — США, 2022.
2. **Смит Н.** Jetpack Compose 1.6 Essentials — США, 2024.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

АРХИТЕКТУРА И БИЗНЕС-КЕЙС ВНЕДРЕНИЯ СУПЕРПРИЛОЖЕНИЙ В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ФИНАНСОВО-ТОРГОВОГО ХОЛДИНГА

Создание цифровых экосистем в российских условиях сопряжено с системными трудностями, обусловленными фрагментацией пользовательских сценариев, высокой конкуренцией на рынке финтех-услуг и необходимостью обеспечения бесшовной интеграции разнородных сервисов [1].

Традиционные мобильные приложения демонстрируют низкую эффективность в условиях требований к удержанию пользователей и монетизации экосистемы. Разработка суперприложения предполагает создание модульной микросервисной архитектуры с единым шлюзом API, интегрирующей банковские операции, платежные сервисы, маркетплейс и коммуникационные функции в единой пользовательской среде.

Для нивелирования проблемы низкой кросс-продажной конверсии применяются системы рекомендаций на основе гибридных алгоритмов, анализа поведения пользователя и предиктивной аналитики. Ключевым аспектом является формирование устойчивой бизнес-модели с монетизацией через комиссионные доходы, премиум-подписки и партнерские программы, что подтверждается расчетом LTV и ROMI на примере российского финансово-торгового холдинга.

Литература

1. **Иванов П.С.**, Цифровые экосистемы: архитектура и монетизация. — М.: ИД «Высшая школа экономики», 2024. — 352 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ РАЗРАБОТКИ И ВЕРИФИКАЦИИ КОДА В ЭПОХУ С АКЦЕНТОМ НА ЦЕПОЧКУ ПОСТАВОК ПО

Обеспечение безопасности программного обеспечения в современных условиях сопряжено с системными трудностями, обусловленными возрастающей сложностью цепочек поставок ПО, использованием сторонних компонентов и необходимостью выявления уязвимостей на ранних этапах разработки [1].

Традиционные подходы к тестированию безопасности демонстрируют низкую эффективность в условиях распределенной разработки и использования открытых исходных кодов. Внедрение безопасной методологии разработки предполагает интеграцию инструментов статического и динамического анализа кода в процесс непрерывной интеграции, а также верификацию сторонних компонентов с помощью сканирования зависимостей.

Для нивелирования проблем доверия в цепочке поставок применяются технологии цифрового подписывания артефактов сборки, верификации их происхождения и мониторинга уязвимостей в реальном времени. Важным аспектом является создание системы управления артефактами с гарантированной целостностью и отслеживаемостью всех компонентов на протяжении их жизненного цикла.

Литература

1. **Кристофер Х., Тернер Т.**, Прозрачное программное обеспечение: Безопасность цепочек поставок ПО — СПб.: Питер, 2025. — 352 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ И СМАРТ-КОНТРАКТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КРОСС-ОРГАНИЗАЦИОННЫХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ (B2B)

Автоматизация кросс-организационных бизнес-процессов в сфере B2B сопряжена с системными трудностями, обусловленными необходимостью обеспечения доверия между независимыми участниками, синхронизации данных в распределённых системах и соблюдения конфиденциальности коммерческой информации [1].

Традиционные централизованные платформы демонстрируют низкую эффективность в условиях требований к прозрачности, безопасности и отказоустойчивости. Адаптация блокчейн-технологии обеспечивает создание децентрализованной, неизменяемой и разделяемой между всеми участниками ledger-системы для верификации транзакций и отслеживания статусов операций.

Для нивелирования проблемы необходимости посредников и ручного согласования документов применяются смарт-контракты, автоматически исполняющие заранее согласованные условия при наступлении соответствующих событий. Важным аспектом является обеспечение юридической значимости совершаемых операций и их соответствия действующему законодательству за счёт интеграции с цифровыми подписями и регуляторными реестрами.

Литература

1. **Тапскотт Д., Тапскотт А.**, Блокчейн-революция: как технология, стоящая за биткоином, меняет деньги, бизнес и мир. — М.: Смарт Ридинг, 2020. — 24 с.

*А.Н. Кошелев, студ.; М.Д. Окулов, студ.;
рук. К.С. Баланев, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ И АНАЛИЗА ВОВЛЕЧЕННОСТИ

Обеспечение эффективности онлайн-обучения сопряжено с системными трудностями, обусловленными разнородным уровнем подготовки обучающихся, индивидуальными когнитивными особенностями и проблемой поддержания длительной концентрации внимания [1].

Традиционные системы управления обучением демонстрируют низкую эффективность в условиях необходимости персонализации образовательных траекторий. Проектирование адаптивной платформы предполагает комбинирование алгоритмов коллаборативной и контентной фильтрации для формирования персональных рекомендаций учебных материалов на основе анализа поведения и успеваемости пользователя.

Для нивелирования проблемы снижения вовлеченности применяется многомерный анализ поведенческих метрик, включая время активности, частоту взаимодействия с элементами курса и результаты формативного оценивания. Важным аспектом является разработка системы интерпретируемой обратной связи, предоставляющей обучающемуся и преподавателю обоснованные рекомендации по коррекции учебного процесса.

Литература

1. **Соколов И.А.**, Цифровая дидактика: принципы и технологии адаптивного обучения. — М.: Издательский дом ВШЭ, 2023. — 284 с.

*М.А. Нефедоров, студ., А.П. Бабешко, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В эпоху цифровой экономики обработка растущих массивов данных требует гибких и масштабируемых решений. Облачные технологии стали ключевым инструментом, позволяя не только хранить большие объемы информации, но и выполнять сложные аналитические задачи без капитальных затрат на собственную инфраструктуру.

Глобальный рынок облачной аналитики демонстрирует рост с ~\$35,7 млрд в 2024 году до прогнозируемых ~\$118,5 млрд к 2029 году. Все больше компаний переходят от локальных решений к облачной модели для повышения гибкости и скорости внедрения аналитических решений.

Облачные аналитические платформы предлагают масштабируемость: их мощности можно динамически увеличивать или уменьшать в зависимости от нагрузки, оплачивая только фактически использованные ресурсы, что напрямую связано с экономической эффективностью, поскольку модель оплаты по факту использования (ОРЕХ) снижает финансовые барьеры и ускоряет запуск проектов. Кроме того, обеспечивается высокая доступность и интеграция: аналитики могут работать удаленно, используя готовые облачные сервисы для анализа данных (BigQuery, AWS Athena и другие).

Крупная розничная сеть загружает данные о продажах и клиентах в облако, что позволяет в пиковые периоды автоматически масштабировать ресурсы для работы аналитических моделей и быстро получать прогнозы спроса, оптимизируя затраты.

Основными рисками являются зависимость от выбранного провайдера облачных услуг и потенциальная потеря гибкости. Кроме того, существует риск постоянного роста затрат в случае неэффективного управления и мониторинга ресурсов. Отдельное внимание необходимо уделять обеспечению безопасности и защите конфиденциальной экономической информации от несанкционированного доступа.

Облачные технологии предоставляют организациям мощный инструмент для экономического анализа, обеспечивая масштабируемость, гибкость и снижая инфраструктурные издержки. При грамотном управлении затратами и рисками они становятся стратегическим преимуществом на пути к цифровой трансформации [1].

Литература

1. Преимущества и недостатки использования облачных технологий // CyberLeninka URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-ispolzovaniya-oblachnyh-tehnologiy> (дата обращения: 21.10.2025).

*М.А. Нефедоров, студ., А.П. Бабешко, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: ДЕРЕВО РЕШЕНИЙ И СЛУЧАЙНЫЙ ЛЕС ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В эпоху цифровизации бизнес-аналитика становится ключевым фактором конкурентоспособности, и компании всё чаще обращаются к методам машинного обучения. Среди распространённых алгоритмов классификации — дерево решений и случайный лес [1].

Дерево решений последовательно задает вопросы о признаках, напоминая человеческое принятие решений, что делает его интуитивно понятным. Однако оно склонно к переобучению и чувствительно к шумам.

Случайный лес, являясь ансамблем множества деревьев, строит их на случайных подвыборках данных и признаков, а итоговый результат формируется голосованием, что снижает риск переобучения, повышает точность и устойчивость к шуму, но модель становится менее интерпретируемой и требует больше ресурсов. Случайный лес широко применяется различных областях благодаря своей надежности.

Пример эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Дерево решений	0.843	0.844	0.843	0.843
Дерево решений (рег.)	0.599	0.431	0.599	0.486
Ансамбль деревьев (лес)	0.901	0.900	0.901	0.900

На практике применимость алгоритмов была проверена на открытом датасете для классификации степени ожирения. Результаты показали, что случайный лес значительно превосходит одиночное дерево решений: точность выросла с 84,3% до 90,1%. Это подтверждает, что ансамблевые методы более устойчивы и точны при работе с многомерными данными.

Оба алгоритма обладают значительным потенциалом для анализа экономических данных. Выбор зависит от конкретной задачи, если важна интерпретируемость результата, подойдет дерево решений, а если приоритетом является высокая точность и устойчивость — случайный лес. Интеграция этих методов, особенно случайного леса, в бизнес-системы позволяет повысить качество прогнозов и автоматизировать принятие решений в финансах, страховании и маркетинге.

Литература

1. Что такое случайный лес? // IBM.com URL: <https://www.ibm.com/think/topics/random-forest>(дата обращения: 10.10.2025).

М.А. Нефедов, студ., А.П. Бабешко, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)

РОЛЬ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В АНАЛИТИКЕ

В условиях роста объемов экономических данных визуализация становится ключевым инструментом аналитики, обеспечивая скорость и глубину восприятия сложных взаимосвязей. В статье рассматриваются основные подходы и современные инструменты визуализации, применяемые в экономических исследованиях.

Аналитика все чаще оперирует большими массивами данных (Big Data), что делает задачу их интерпретации нетривиальной, так как текстовая и табличная формы представления информации не позволяют оперативно выявлять паттерны, тренды и аномалии. Визуализация данных преобразует числовые последовательности в графические образы, значительно ускоряя процесс познания и принятия решений.

Основные подходы к визуализации:

1. Временные ряды — классический подход для отображения динамики показателей. Основные инструменты линейные и столбчатые диаграммы.
2. Сравнительный анализ используется для сопоставления показателей, наиболее эффективны столбчатые диаграммы и радиальные диаграммы.
3. Структурный анализ позволяет показать состав и долю компонентов в общей совокупности, применяются круговые и кольцевые диаграммы, диаграммы-воронки.
4. Корреляционный и регрессионный анализ визуализирует взаимосвязи между переменными. Для этого используются точечные диаграммы и тепловые карты.
5. Геопространственный анализ отображает данные на картах для выявления региональных различий, реализуется с помощью картограмм.

Визуализация данных превратилась из вспомогательного метода в неотъемлемый компонент экономического анализа. Грамотное применение визуальных подходов и инструментов позволяет не только проиллюстрировать готовые выводы, но и провести первичный разведочный анализ, обнаружить скрытые закономерности и эффективно донести результаты исследования.

Литература

1. **Маккинни, У.** Python для анализа данных / У. Маккинни. — СПб. : Питер, 2023. — 482 с. — Содержит практические примеры построения визуализаций с использованием библиотек Pandas, Matplotlib и Seaborn.

*М.А. Нефедов, студ., А.П. Бабешко, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ВРЕМЕННОЙ РЯД И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ВЫБОРКА. ОСНОВНЫЕ ОТЛИЧИЯ

Временной (динамический) ряд — это последовательность наблюдений экономического признака в последовательные моменты времени.

Под временными данными понимается совокупность информации, характеризующей один и тот же объект, но за разные периоды времени. По аналогии с пространственной выборкой отдельно взятый временной ряд можно считать выборкой из бесконечного ряда значений показателей во времени.

В качестве примера можно привести данные (наблюдения) о динамике индекса потребительских цен, ежедневные обменные курсы валют. Временная информация естественным образом упорядочена во времени в отличие от пространственных данных.

Пространственная выборка — это набор наблюдений, сделанных в один момент времени (день, месяц, год и т.д.) для различных однотипных объектов. В качестве примера пространственных данных можно привести совокупность различной информации по какому-либо предприятию (численность работников, объем производства, размер основных фондов), об объемах потребления продукции определенного вида и т.д.

Примером пространственной выборки могут быть медальные результаты на Олимпийских играх. Несколько стран и их медальный зачет в один промежуток времени.

Существуют определенные отличия временного ряда от пространственной выборки:

1. Элементы динамического ряда не являются статистически независимыми, в отличие от элементов случайной пространственной выборки, т. е. они подвержены явлению автокорреляции (зависимости между прошлыми и текущими наблюдениями временного ряда);
2. Элементы динамического ряда не являются одинаково распределенными величинами.

Понимание этой разницы является критически важным для корректного выбора инструментов моделирования и получения достоверных результатов в эконометрических исследованиях.

Литература

1. **Кендал М., Стьюарт А.** Многомерный статистический анализ и временные ряды. — М.: Наука, 1976. — 736 с.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТТОКА КЛИЕНТОВ: ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ВЫГОДА И ОРГАНИЗАЦИОННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В условиях высокой конкуренции на рынках телекоммуникаций, финансовых услуг и SaaS удержание клиентов становится критически важным. Традиционные методы борьбы с оттоком, применяемые после ухода клиента, неэффективны и ведут к финансовым потерям. Это обуславливает актуальность внедрения систем прогнозирования оттока на основе искусственного интеллекта.

Современные алгоритмы машинного обучения, такие как градиентный бустинг и случайный лес, позволяют выявлять сложные паттерны в поведении клиентов, используя данные о транзакциях, активности и обращениях в поддержку [1]. Это обеспечивает переход к проактивному управлению, основанному на данных.

Экономическая эффективность таких систем оценивается через возврат на инвестиции (ROI). Эффект достигается за счет сравнения стоимости удержания клиента и стоимости его привлечения, которая в 5–7 раз выше. Внедрение ИИ-моделей позволяет предотвратить потерю доходов и оптимизировать маркетинговые расходы.

Организационная реализация требует интеграции системы прогнозов в операционные процессы компании, прежде всего в CRM. Это позволяет автоматически запускать персонализированные кампании удержания для клиентов группы риска. Ключевым фактором успеха является обучение сотрудников и адаптация бизнес-процессов.

Внедрение систем прогнозирования оттока формирует новый стандарт клиентоориентированного бизнеса, повышая эффективность управления и обеспечивая значительную экономию ресурсов.

Литература

1. **Рашка С., Лю Ю., Мирджалили В.** Машинное обучение с PyTorch и Scikit Learn / С. Рашка, Ю. Лю, В. Мирджалили; пер. с англ. — СПб.: Питер, 2023. — 800 с.

Д.А. Райков, студ., А.С. Бушков, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ WITH TIES

При работе с SQL часто требуется выбрать строки с экстремальными значениями — например, записи с максимальной датой или наибольшим числовым показателем [1]. Традиционные подходы с использованием JOIN или подзапросов могут быть неэффективны при больших объемах данных:

```
SELECT o.* FROM orders o
JOIN (SELECT MAX(created_at) as max_date FROM orders) m
ON o.created_at = m.max_date;
Подзапрос в WHERE:
SELECT * FROM orders
WHERE created_at = (SELECT MAX(created_at) FROM orders);
```

Оба метода требуют многократного обращения к данным, что снижает производительность. Актуальные версии СУБД предлагают конструкцию WITH TIES:

```
SELECT * FROM orders
ORDER BY created_at DESC
FETCH FIRST 1 ROW WITH TIES;
```

WITH TIES возвращает не только указанное количество первых строк, но и все последующие с идентичными значениями в столбцах ORDER BY. В примере вернутся все заказы с максимальной датой создания, включая случаи с одинаковыми значениями.

Поиск сотрудников с максимальной зарплатой в отделах:

```
SELECT *
FROM employees
ORDER BY department_id, salary DESC
FETCH FIRST 1 ROW WITH TIES;
```

Запрос возвращает всех сотрудников каждого отдела с максимальной зарплатой, включая случаи с одинаковыми значениями.

Конструкция учитывает все столбцы ORDER BY. Для точного контроля результата необходимо явно определять релевантные столбцы сортировки.

WITH TIES — эффективный современный метод выборки экстремальных значений, особенно полезный в аналитических запросах и бизнес-отчетности, где требуется полнота данных и идентификация всех записей с лидирующими значениями.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

*Д.А. Райков, студ., А.С. Бушков, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРКИ ПЕРВЫХ ЗАПИСЕЙ В ГРУППАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DISTINCT ON И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИНДЕКСОВ

При необходимости выборки первых записей в группах согласно определенному порядку традиционно применяются оконные функции с ROW_NUMBER(). Однако для крупных таблиц это решение может быть неоптимальным из-за необходимости полного сканирования и сортировки данных [1]. Альтернативным подходом является использование конструкции DISTINCT ON в сочетании с составным индексом.

Запрос с оконной функцией предполагает создание ранжированной выборки с последующей фильтрацией. Оптимизированное решение заключается в предварительном создании индекса:

```
CREATE INDEX idx_events_user_score  
ON events (user_id, score DESC, event_time DESC);  
С последующим использованием DISTINCT ON:  
SELECT DISTINCT ON (user_id) user_id, id, score, event_time  
FROM events  
ORDER BY user_id, score DESC, event_time DESC;
```

Ключевым преимуществом данного подхода является повышение производительности за счет исключения операций полного сканирования и сортировки данных. Специализированный индекс позволяет напрямую обращаться к требуемым записям, что значительно сокращает время выполнения запроса. Дополнительным преимуществом является улучшение читаемости кода и снижение нагрузки на систему.

Особенностью работы DISTINCT ON является сохранение первой строки для каждой уникальной комбинации указанных столбцов в порядке, определенном предложением ORDER BY. Критически важным условием эффективности метода является строгое соответствие порядка сортировки в запросе структуре индекса.

Данный подход демонстрирует наибольшую эффективность в СУБД PostgreSQL и оптимален для сценариев, требующих выборки ограниченного количества записей из крупных таблиц, таких как получение последних действий пользователей или наиболее релевантных результатов. Комбинация DISTINCT ON с корректно спроектированным индексом представляет собой производительную альтернативу традиционным методам с использованием оконных функций.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

*Д.А. Райков, студ., А.С. Бушков, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРКЕ ПОСЛЕДНИХ ЗАПИСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКОННЫХ ФУНКЦИЙ

Для выборки последних записей в группах данных существует универсальный подход, основанный на оконных функциях, который работает во всех современных СУБД [1]. Оконные функции предоставляют инструментарий для работы с группами данных без необходимости использования сложных подзапросов и соединений. Решение с ROW_NUMBER() является отраслевым стандартом для задач выборки первых/последних записей.

Универсальное решение:

```
WITH ranked AS (
SELECT
    user_id,
    order_id,
    created_at,
    ROW_NUMBER() OVER (
        PARTITION BY user_id
        ORDER BY created_at DESC
    ) AS rn
FROM orders
)
SELECT user_id, order_id, created_at
FROM ranked
WHERE rn = 1;
```

Функция ROW_NUMBER() присваивает порядковый номер каждой строке внутри раздела (PARTITION BY user_id), упорядоченного по дате создания в убывающем порядке. Фильтрация по rn = 1 выбирает только самые свежие записи для каждого пользователя.

Для улучшения производительности рекомендуется создание индекса:

```
CREATE INDEX idx_orders_user_created ON orders (user_id, created_at DESC);
```

Данный подход является рекомендуемым отраслевым стандартом для задач выборки крайних значений в группах данных и обеспечивает оптимальный баланс между производительностью, читаемостью и переносимостью кода.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

*Д.А. Райков, студ., А.С. Бушков, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БАЗ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛОГИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СХЕМ

Логическая изоляция посредством схем предусматривает создание отдельных пространств имен внутри одной базы данных с последующим назначением ограниченных прав доступа для различных пользователей или модулей приложения [1]. Такой подход обеспечивает сегментацию данных на логическом уровне без необходимости развертывания отдельных физических баз данных. Пример организации изоляции:

--Создание схем для различных модулей системы

CREATE SCHEMA Orders;

CREATE SCHEMA Shipping;

-- Создание пользователя для модуля заказов с ограничением доступа

CREATE USER OrdersUser WITH DEFAULT_SCHEMA = Orders;

GRANT SELECT, INSERT, UPDATE, DELETE ON SCHEMA::Orders TO OrdersUser;

-- Создание пользователя для модуля доставки

CREATE USER ShippingUser WITH DEFAULT_SCHEMA = Shipping;

GRANT SELECT, INSERT, UPDATE, DELETE ON SCHEMA::Shipping TO ShippingUser;

Каждый модуль приложения работает с учетными данными, имеющими доступ только к соответствующей схеме, что ограничивает потенциальный ущерб в случае компрометации учетной записи. Администрирование прав доступа осуществляется на уровне схем, что делает процесс управления более прозрачным и структурированным. Разделение данных по логическим доменам способствует созданию модульной и поддерживаемой структуры базы данных. Подход позволяет достичь изоляции данных в рамках единой базы данных, что оптимизирует использование вычислительных ресурсов.

Использование логической изоляции через схемы представляет собой эффективный метод повышения безопасности баз данных и упрощения управления доступом. Данный подход соответствует современным стандартам информационной безопасности и способствует созданию чистой, модульной архитектуры приложений. Внедрение этой методики позволяет существенно снизить риски, связанные с несанкционированным доступом к данным, и облегчает сопровождение информационных систем на протяжении всего их жизненного цикла.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

Л.С. Марков, студ.; рук. А.Л. Алыкова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТЕВОЙ ПОДСИСТЕМЫ СУБД POSTGRES

Сегодня производительность СУБД зависит не только от того, насколько удачно она проводит оптимизацию запросов, но также от того, насколько она эффективно взаимодействует с сетью.

В докладе рассматривается использование подхода Kernel Bypass для оптимизации сетевой подсистемы СУБД Postgres. Сегодня для работы с сетью обычно используют ядро ОС, в нашем случае Linux. Данный подход связан с большим количеством накладных расходов при получении и отправке пакетов, так как приходится использовать системные вызовы. Для снижения этих расходов можно работать с сетевой картой в обход ядра, то есть избегая большого количества системных вызовов. Такой подход называется Kernel Bypass и для его реализации может быть использован DPDK [1]. DPDK (Data Plane Development Kit) — фреймворк, который обеспечивает низкоуровневый, но универсальный интерфейс для использования UIO (user space IO). DPDK построен поверх основного Kernel Bypass и предоставляет большое количество других интересных возможностей, в том числе шифрование трафика, сжатие трафика, а также содержит большое количество Lock-Free структур данных. При отправке и приеме пакетов DPDK не использует механизм прерываний, применяя при этом PMD (Poll Mode Driver) драйвер. Вместо того, чтобы ждать, что сетевая карта сама уведомит о поступлении пакета, драйвер будет ее постоянно опрашивать о появлении нового пакета.

Безусловно, заменить таким решением основную сетевую подсистему Postgres невозможно, при этом есть возможность использовать расширяемость, которая была заложена основателями проекта Postgres. Благодаря расширяемости, а также возможности создавать «Background Workers» [2] во время выполнения есть возможность представить DPDK для Postgres как отдельное расширение, не меняя основную подсистему работы с сетью.

Литература

1. **Официальный сайт DPDK** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dpdk.org/> (дата обращения 04.09.2025).
2. **Background Worker Processes** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/bgworker.html> (дата обращения 01.09.2025).

Е.Ю. Черненкова, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

РОЛЬ БИЗНЕС-АНАЛИТИКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ КОМПАНИЕЙ

В условиях цифровой экономики конкурентоспособность компании все меньше определяется активами и все больше — скоростью и качеством принимаемых решений. Ключевую роль в этом процессе играет бизнес-аналитика, которая превращает разрозненные данные в стратегический актив для управления.

Бизнес-аналитика эволюционировала от простой ретроспективной отчетности к сложным системам, обеспечивающим проактивное управление. Современные BI-платформы позволяют не только видеть, что произошло, но и понимать, почему это случилось, и прогнозировать будущие тренды.

Внедрение систем бизнес-аналитики предоставляет компаниям ряд стратегических преимуществ, трансформирующих подход к управлению. Прежде всего, это повышение операционной эффективности — аналитические инструменты позволяют выявлять «узкие места» в бизнес-процессах и оптимизировать затраты времени и ресурсов. Не менее важно ускорение принятия решений: руководители всех уровней получают доступ к интуитивно понятным дашбордам с актуальной информацией в режиме реального времени. Кроме того, бизнес-аналитика обеспечивает углубленное понимание клиента за счет анализа данных о поведении, что помогает выстраивать персонализированные коммуникации и повышать лояльность. Наконец, прогнозные модели позволяют отслеживать потенциальные рыночные колебания, снижая риски для компании.

Важным аспектом является интеграция аналитики в систему корпоративного управления и соответствия. Например, для публичных компаний стратегии работы с данными напрямую влияют на выполнение требований [1]. Использование BI-систем помогает обеспечивать прозрачность и достоверность данных, что является одной из ключевых задач современного менеджмента.

Бизнес-аналитика перестала быть опциональным инструментом и стала неотъемлемым компонентом системы управления современной компанией. Это связующее звено между сырыми данными и стратегическими решениями, которое обеспечивает устойчивый рост и конкурентные преимущества в постоянно меняющейся бизнес-среде.

Литература

1. [Электронный ресурс] — Режим доступа: Кодекс корпоративного управления утв. Банком России 10.04.2014 № 06-52/2463.

Е.Ю. Черненкова, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIG DATA В БИЗНЕСЕ

В современной бизнес-реальности способность извлекать ценность из информации становится критически важным конкурентным преимуществом. Организации ежедневно аккумулируют значительные объемы структурированных и неструктурированных данных, отражающих клиентское поведение, операционную деятельность и рыночную динамику. Именно технологии Big Data позволяют трансформировать разрозненные данные в стратегические инсайты, обеспечивая основу для взвешенных управленческих решений и долгосрочного планирования.

Традиционно управленческие решения часто основывались на интуиции и ограниченных выборках. Big Data кардинально меняет эту парадигму, позволяя принимать решения, которые основаны на полной и объективной картине, что значительно повышает их точность и эффективность.

Чтобы извлечь максимальную пользу из Big Data, недостаточно просто купить мощное аналитическое ПО. Необходимо выстроить в компании культуру, основанную на данных (data-driven culture). Это означает, что на всех уровнях управления решения должны подкрепляться цифрами и результатами анализа, а не только личным опытом.

Стратегические решения, такие как выход на новый рынок, запуск новой продуктовой линейки или оптимизация всей цепочки создания стоимости, требуют комплексного подхода. Как отмечают эксперты McKinsey & Company, компании, широко использующие анализ данных, имеют все шансы на то, чтобы обогнать своих конкурентов по производительности и прибыльности [1]. Это возможно именно потому, что они могут точнее прогнозировать тенденции, эффективнее распределять ресурсы и быстрее реагировать на изменения рыночной конъюнктуры.

Владение инструментами анализа Big Data является критически важным фактором сохранения конкурентоспособности современных организаций. Преобразование разнородных данных в стратегические управленческие решения позволяет компаниям осуществлять переход от реагирования на изменения к их прогнозированию и формированию.

Литература

1. [Электронный ресурс] — Режим доступа: Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity / McKinsey & Company.

Е.Ю. Черненкова, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

DATA-DRIVEN КОМПАНИЯ: СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ДЛЯ РОСТА БИЗНЕСА

В современных организациях наблюдается значительная фрагментация данных. Информационные массивы различных структурных подразделений демонстрируют низкую степень согласованности, что выражается в расхождениях отчетных показателей и увеличении временных затрат на аналитические процедуры. Данная ситуация свидетельствует о недостаточной эффективности систем управления.

Data-driven подход позволяет трансформировать разрозненные данные в инструмент повышения операционной эффективности и выявления новых направлений развития, что формирует основу устойчивой для конкурентоспособности и роста бизнеса.

Стратегия управления данными основывается на нескольких ключевых принципах. Единый источник правды создается через централизованное хранилище данных (озеро данных), что исключает противоречия в информации. Особое внимание нужно уделить качеству данных — принцип «garbage in — garbage out» («мусор на входе — мусор на выходе») здесь актуален как никогда, поэтому точность, полнота и актуальность данных должны быть приоритетом. Не менее важны формирование data-driven культуры среди сотрудников и обеспечение безопасности данных [1].

Как отмечается в статье «Data Quality: почему качество данных — это основа data-driven компании» на Habr, без качественных данных любые инвестиции в аналитические системы теряют смысл [2], поскольку некорректная информация приводит к ошибочным выводам и неэффективным управленческим решениям. Комплексное внедрение этих элементов преобразует данные в бизнес-ценность, обеспечивая рост показателей и укрепление конкурентных позиций.

Литература

1. Федеральный закон Российской Федерации «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152 // Официальный интернет-портал правовой информации.
2. [Электронный ресурс] — Режим доступа: Data Quality: почему качество данных — это основа data-driven компании/

Е.Ю. Черненко, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

РОЛЬ БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКИ В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

В условиях современной экономической реальности цифровая трансформация перестала быть опцией и превратилась в императив для выживания и роста компаний. Бизнес-информатика, как междисциплинарная область, обеспечивает методологическую основу для этого перехода, связывая ИТ-стратегию с бизнес-целями. Ключевым драйвером этой трансформации сегодня становится интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ) в бизнес-процессы предприятий.

Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы определяет цифровую трансформацию как национальный приоритет, акцентируя внимание на развитии сквозных цифровых технологий, включая искусственный интеллект [1]. В этом контексте бизнес-информатика предлагает комплексный подход к цифровизации, который начинается не с внедрения технологий, а с редизайна бизнес-модели и архитектуры процессов. Специалисты в этой области анализируют потоки данных, выявляют «узкие места» и проектируют сквозные процессы, готовые к автоматизации. Именно на этой подготовленной почве технологии ИИ дают максимальный эффект.

Внедрение алгоритмов машинного обучения и предиктивной аналитики позволяет перейти от реагирования на проблемы к проактивному управлению. Например, в логистике ИИ-модели оптимизируют маршруты в реальном времени, предсказывают сроки доставки и автоматически перенаправляют грузы при сбоях, что напрямую влияет на снижение издержек и повышение клиентской удовлетворенности.

Успешная трансформация требует преодоления значительных вызовов, включая проблему качества данных и высокие первоначальные инвестиции. Роль бизнес-информатики заключается в том, чтобы управлять этим переходом, обеспечивая не только технологическую интеграцию, но и организационные изменения, обучение сотрудников и пересмотр KPI.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» от 09.05.2017 № 203 // Официальный интернет-портал правовой информации.

Е.Ю. Черненкова, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ И УПРАВЛЕНИЕ

Современный бизнес столкнулся с необходимостью цифровой трансформации, где искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в переосмыслении традиционных подходов к управлению и организации процессов. От автоматизации рутинных операций до стратегического прогнозирования — ИИ становится катализатором изменений во всех сферах предпринимательской деятельности.

Современные системы на основе ИИ предоставляют руководителям инструменты для принятия рациональных решений, основанных на глубоком анализе неструктурированных данных. Платформы предиктивной аналитики обрабатывают экзбайты информации, выявляя скрытые рыночные тенденции и потребительские предпочтения, что особенно ценно в условиях быстро меняющейся экономической среды. Как отмечается в исследовании «Искусственный интеллект в бизнесе: практики применения» на популярной площадке для предпринимателей VC.ru, компании, внедрившие AI-решения, демонстрируют рост точности прогнозов на 40% по сравнению с традиционными методами [1], позволяя не только реагировать на изменения рынка, но и превентивно формировать его.

Развитие ИИ-технологий требует создания соответствующей нормативной базы. Международный стандарт ISO/IEC 23894:2023 устанавливает руководство по управлению рисками в области искусственного интеллекта, помогая организациям внедрять ответственный AI [2]. Вопросы этики, включая предотвращение дискриминации алгоритмов и обеспечение прозрачности принятия решений, становятся критически важными для устойчивого развития технологий.

Внедрение технологий искусственного интеллекта позволяет предприятиям достигать беспрецедентного уровня эффективности. В логистике алгоритмы машинного обучения оптимизируют маршруты поставок, сокращая расходы на топливо и эксплуатацию транспорта. Финансовые службы используют ИИ для автоматической проверки документов и выявления мошеннических операций в реальном времени.

Литература

1. [Электронный ресурс] — Режим доступа: Искусственный интеллект в бизнесе/
2. [Электронный ресурс] — Режим доступа: Международный стандарт ISO/IEC 23894:2023.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

В современных условиях цифровой трансформации российские предприятия сталкиваются с необходимостью модернизации систем управления. Особую актуальность приобретает внедрение ERP-систем как ключевого элемента цифровой инфраструктуры [1]. Однако отсутствие комплексного подхода к экономическому обоснованию и управлению такими проектами приводит к значительным финансовым потерям и неэффективному использованию ресурсов.

Современные методики экономического обоснования ERP-проектов предлагают комплексный подход к оценке эффективности инвестиций. В отличие от традиционных методов, они учитывают не только прямые затраты на лицензии и внедрение, но и скрытые издержки, включая обучение персонала и организационные изменения. Это позволяет сформировать реалистичную оценку совокупной стоимости владения (ТСО) и ожидаемых выгод.

Особенностью успешного управления является разработка системы сбалансированных показателей. Создаются методики оценки эффективности, включающие сравнение ключевых показателей до и после внедрения — производительность труда, оборачиваемость запасов, длительность финансовых циклов. Разрабатываются системы мониторинга, учитывающие соблюдение сроков и соответствие бюджету.

Эффективное управление проектом требует учета организационных аспектов цифровой трансформации. Особое внимание уделяется управлению сопротивлением персонала, адаптации бизнес-процессов и обеспечению преемственности операционной деятельности. Комплексный подход к изменению управленческих процессов формирует основу для успешной цифровой трансформации.

Внедрение ERP-систем в условиях цифровой трансформации повышает эффективность управления предприятием. Разработка специализированных методик экономического обоснования и управления проектами позволяет масштабировать лучшие практики и оптимизировать инвестиции в цифровые технологии.

Литература

1. **Ильин В.В.** Внедрение ERP-систем: управление экономической эффективностью / В.В. Ильин. — М.: Дело, 2023. — 288.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НОТАЦИИ IDEF0 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

В современных условиях цифровой трансформации российские предприятия сталкиваются с необходимостью формализации и оптимизации бизнес-процессов. Особую актуальность приобретает использование стандартизированных нотаций для моделирования деятельности организации. Среди них нотация IDEF0 остается одним из наиболее эффективных инструментов для описания и анализа бизнес-процессов [1].

Современная методология IDEF0 предлагает системный подход к моделированию деятельности предприятия. В отличие от других нотаций, IDEF0 позволяет представить бизнес-процесс как преобразование входов в выходы при наличии управления и механизмов выполнения. Это обеспечивает комплексное представление о процессе, учитывающее все аспекты его функционирования.

Особенностью нотации IDEF0 является ее строгая иерархическая структура. Моделирование начинается с контекстной диаграммы, определяющей границы процесса, и детализируется на последующих уровнях декомпозиции. Разрабатываются функциональные блоки, четко описывающие действия, а также стрелки, показывающие взаимосвязи между операциями и внешней средой.

Практическое применение IDEF0 включает несколько этапов: определение цели моделирования, сбор информации, построение диаграмм и их валидацию. Особое внимание уделяется правилам синтаксиса и семантики нотации, что обеспечивает однозначное толкование моделей всеми участниками проекта.

Внедрение методологии IDEF0 повышает эффективность управления бизнес-процессами предприятия. Стандартизация подходов к моделированию формирует основу для последующей оптимизации и автоматизации процессов. Особенно перспективно интеграция IDEF0 с современными системами бизнес-моделирования, что позволяет создавать комплексные модели организаций любого масштаба.

Литература

1. Киселёв Д. Ю., Киселёв Ю. В., Вавилин А. В. Функциональное моделирование на базе стандарта IDEF0. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 80 с.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В УПРАВЛЕНИИ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК: ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИКИ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА И УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСАМИ

В условиях глобализации рынков и роста неопределенности внешней среды современные цепочки поставок требуют новых подходов к управлению. Особую актуальность приобретает проблема эффективного использования больших данных (Big Data) для повышения гибкости, надежности и экономической эффективности логистических операций. Отсутствие системного подхода к анализу данных приводит к значительным потерям из-за избыточных запасов, неоптимальных маршрутов и несоответствия спроса и предложения [1].

Современные технологии больших данных предлагают новые возможности для управления цепочками поставок. В отличие от традиционных методов, основанных на исторических данных и экспертных оценках, Big Data позволяют анализировать в реальном времени разнородную информацию — данные GPS-трекинга, прогнозы погоды, социальные тренды, поведение потребителей и состояние инфраструктуры. Это обеспечивает переход от реактивного к проактивному управлению логистикой.

Ключевая особенность Big Data — создание комплексных моделей. Они включают в себя алгоритмы прогнозирования спроса, системы динамической оптимизации маршрутов и модели управления запасами, которые автоматически адаптируются к изменению спроса и надёжности поставщиков.

Внедрение технологий Big Data в управление цепочками поставок повышает эффективность логистических операций. Комплексный анализ информации формирует основу для создания самонастраивающихся цепочек поставок. Особенно перспективна разработка цифровых двойников цепочек поставок, что позволит моделировать различные сценарии и выбирать оптимальные решения в условиях неопределенности.

Литература

1. **Анналин Ын, Кеннет Су** Теоретический минимум по Big Data. Всё что нужно знать о больших данных. — СПб: Питер, 2019. — 208 с.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ДЕРЕВО РЕШЕНИЙ КАК АЛГОРИТМ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ СЛОЖНЫХ БИЗНЕС-РЕШЕНИЙ

В условиях неопределенности менеджеры часто принимают решения на основе интуиции, что ведет к субъективным и неоптимальным результатам. Актуальной задачей становится применение структурированных методов, позволяющих оценивать последствия решений и выбирать стратегию с максимальной эффективностью [1].

Дерево решений — это наглядный алгоритм, поддерживающий принятие решений в условиях неопределенности. В отличие от интуитивных методов, он системно учитывает возможные сценарии, вероятности их наступления и количественные результаты. Модель строится из узлов решений, случайных событий и ветвей, отражающих альтернативные варианты.

Особенностью метода является оценка ожидаемой ценности каждого пути. Расчеты проводятся от конечных исходов к начальному решению, суммируя вероятностно взвешенные результаты. Это позволяет сравнить сложные многоуровневые стратегии, например, оценить целесообразность маркетингового исследования перед запуском продукта.

Ключевое преимущество подхода — прозрачность и обоснованность выбора. Менеджер видит, какая альтернатива принесет наибольшую отдачу с учетом рисков. Метод эффективен для инвестиционного анализа, управления проектами и оценки рисков.

Перспективы развития связаны с интеграцией машинного обучения для автоматического построения деревьев на основе больших данных. Совершенствование инструментов визуализации упрощает моделирование сложных сценариев, а комбинация с другими методами создает комплексные системы поддержки принятия решений.

Литература

1. **Орлов А.И.** Теория принятия решений: учебник. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 480 с.

Е.Д. Лебедев, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД МОЗГОВОГО ШТУРМА: КЛАССИКА КРЕАТИВНОГО МЫШЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ БИЗНЕСЕ

В условиях необходимости постоянной генерации инновационных идей метод мозгового штурма остается одним из наиболее востребованных инструментов в бизнес-аналитике и управлении [1]. Несмотря на появление новых методик, его простота и эффективность обеспечивают устойчивую популярность в корпоративной среде.

Мозговой штурм представляет собой структурированный групповой метод генерации идей, основанный на принципах отсроченной критики и количественного перехода в качество. Классическая методика включает три обязательных этапа: постановку проблемы, генерацию идей и их оценку. Особое значение имеет соблюдение базовых правил — запрет критики, поощрение нестандартных предложений и комбинирование идей.

Особенностью успешного применения метода является качественная модерация сессии. Опытный ведущий контролирует соблюдение регламента, стимулирует активность участников и предотвращает доминирование отдельных членов группы. Современная практика показывает эффективность сочетания индивидуальной и групповой работы — метода «мозгового письма», когда участники сначала формулируют идеи самостоятельно, а затем обсуждают их коллективно.

Ключевым преимуществом методики остается ее универсальность и адаптивность. Мозговой штурм успешно применяется для решения задач различной сложности — от разработки названия продукта до оптимизации бизнес-процессов. Исследования подтверждают, что групповые сессии позволяют генерировать на 30–40% больше идей по сравнению с индивидуальной работой.

Перспективы развития метода связаны с цифровизацией и интеграцией технологий искусственного интеллекта. Онлайн-доски и специализированное программное обеспечение позволяют эффективно организовывать распределенные сессии. Развитие получают гибридные форматы, сочетающие живые обсуждения с автоматизированным анализом и систематизацией результатов.

Литература

1. **Нумми П.** Идеалог — за пределы мозгового штурма. — М.: IMPER Group, 2021. — 136 с.

Н.С. Панкратов, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

РОЛЬ BPM-ПЛАТФОРМ В АРХИТЕКТУРЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЗАЦИЙ

BPM-платформа — это системный инструмент для автоматизации и управления бизнес-процессами. Она создает горизонтальные рабочие потоки между отделами, упорядочивая задачи и устраняя раздробленность процедур. В результате повышается прозрачность операций, платформа контролирует выполнение каждого шага, минимизируя задержки и ошибки.

Современные BPM-системы включают в себя конструкторы процессов, движки исполнения, мониторинг и аналитику, а также интеграцию с корпоративными сервисами. Они выступают архитектурным каркасом цифровой трансформации, связывая людей, данные и технологии. Gartner прогнозирует [1], что к 2025 году 85% организаций, внедряющих гиперавтоматизацию (характерную для BPM-платформ), повысят операционную эффективность на 30%.

Новизна подхода заключается в интеграции BPM с новыми технологиями. Современные платформы объединяют low-code инструменты, роботов и аналитические сервисы, обеспечивая быстрое прототипирование и непрерывное улучшение процессов. Такие платформы служат точкой интеграции с другими корпоративными системами (ERP, CRM, ESB и др.), обеспечивая согласованность данных и процессов в масштабах всей организации.

Перспективы применения BPM-систем связаны с их эволюцией в сторону интеллектуального и самообучающегося управления, такие системы могут не только исполнять процессы, но и самостоятельно анализировать данные и подсказывать оптимизации.

В итоге BPM-платформа выступает ключевым элементом IT-архитектуры цифровой трансформации, обеспечивая сквозную автоматизацию и единство процессов. Анализ современных подходов показывает, что ее роль выходит за рамки автоматизации, превращая BPM в связующее звено между стратегией и тактической реализацией цифровой трансформации.

Литература

1. BPM Solution for 2025: Trends and Updates // rootstack URL: rootstack.com (дата обращения: 21.11.2025).

Н.С. Панкратов, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

LOW-CODE ПЛАТФОРМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ УСКОРЕННОЙ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ И РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Платформы low-code ускоряют разработку приложений и минимизируют ручное программирование. Они предлагают визуальные конструкторы и готовые модули, позволяя непрофессионалам быстро создавать бизнес-приложения и оптимизировать процессы. Такие инструменты позволяют создавать, тестировать и развёртывать решения существенно быстрее, без длительных циклов программирования и тяжёлой нагрузки на ИТ-специалистов. Согласно [1], Gartner прогнозирует, что к концу 2025 года до 70% новых корпоративных приложений будут создаваться на low-code/no-code инструментах. К ключевым преимуществам low-code можно отнести:

1. Ускорение разработки — бизнес-аналитики собирают решения из готовых компонентов, сокращая время выпуска новых функций.
2. Участие конечных пользователей и аналитиков в разработке сокращает разрыв между ИТ и бизнесом.
3. Low-code разработка требует в разы меньше ресурсов (например, 25 аналитиков вместо 100 разработчиков).

Таким образом, при выборе low-code решения ключевыми становятся не только скорость разработки, но и такие стратегические аспекты как способность системы развиваться, её совместимость с другим софтом и потенциальные расходы на поддержку. Внедрение целесообразно начинать с пилотных процессов, что позволяет продемонстрировать ценность и сформировать внутренние компетенции.

Перспективы low-code связаны с его плотной интеграцией с искусственным интеллектом, такие платформы смогут автоматически генерировать код, учить данные в реальном времени и быстро адаптироваться под новые задачи. В целом можно ожидать, что low-code в ближайшие годы станет центральным звеном в стратегии цифровой трансформации организаций и государства.

Литература

1. Gartner Says Cloud Will Be the Centerpiece of New Digital Experiences // gartner URL: [gartner.com](https://www.gartner.com) (дата обращения: 21.11.2025).

Н.С. Панкратов, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ

Современные BPM-платформы всё чаще используют методы машинного обучения для предиктивного мониторинга — прогнозирования поведения процессов [1]. Задачи включают прогноз результата, оставшегося времени или следующих действий в кейсе. Последовательность событий процесса хорошо ложится на рекуррентные нейросети (LSTM), которые существенно превосходят классические модели в точности предсказаний:

- прогноз времени — дата завершения текущего процесса;
- прогноз шага — определение следующего действия в процессе;
- классификация — оценка вероятного исхода или аномалий в ходе выполнения.

LSTM-сети решают такие задачи, давая точные прогнозы параметров процесса. Согласно [2], на производстве Siemens нейросети позволяют спрогнозировать поломку оборудования задолго до её наступления, заранее планируя техобслуживание и минимизируя простой техники.

В целом, нейросетевые предиктивные BPM-модели открывают новые возможности для проактивного управления. Внедрение нейросетевых предиктивных моделей в BPM повышает интеллектуальность управления и меняет подход к автоматизации процессов.

Проведенный анализ современных исследований и архитектур предиктивных моделей позволяет систематизировать их по уровню интеллектуальности: от базового прогнозирования до систем, способных генерировать рекомендации. В рамках данного направления видится перспективной разработка гибридных моделей, сочетающих предиктивную аналитику с генеративными возможностями. Такие системы смогут не только предсказывать отклонения, но и автономно формировать сценарии их устранения. Реализация этого подхода потребует решения проблем с прозрачностью и понятностью решений, которые принимает алгоритм.

Литература

1. Wil M. P. van der Aalst, Josep Carmona. Predictive Process Monitoring, 2022.
2. The convergence of BPM & AI: Enabling real-time process optimization // ProcessExcellenceNetwork URL: processexcellencenetwork.com (дата обращения: 21.11.2025).

Н.С. Панкратов, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ФОРМАЛИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ КОРПОРАТИВНЫХ БИЗНЕС-ПРАВИЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТА DMN

Стандарт DMN (Decision Model and Notation) [1], разработанный OMG для формализации управленческих решений, позволяет описывать бизнес-правила в графическом виде — создаются Decision Requirements Diagrams (визуальное представление логики принятия решений) и Decision Tables (таблицы решений). Модель DMN определяет входные данные и логику правил в понятном виде, что упрощает автоматизацию принятия решений.

Ключевое преимущество DMN — прямое исполнение моделей. Бизнес-аналитики формализуют логику в таблицах, а движок правил (BRMS) автоматически исполняет их при выполнении процессов. Это минимизирует разрыв между бизнес-требованиями и ИТ, правила остаются прозрачными для обеих сторон, а изменения оперативно внедряются.

DMN позволяет систематизировать его ключевые преимущества: визуальная формализация правил, независимость от ИТ стэка и прямое исполнение моделей. Перспективным представляется использование стандарта как основы для систем с элементами ИИ, где DMN обеспечит прозрачность принимаемых решений.

Перспективы DMN связаны с его интеграцией с процессными стандартами BPMN (Business Process Model and Notation) / CMMN (Case Management Model and Notation) и движками автоматизации. Это открывает путь к «сервисам принятия решений», где логика правил внедряется напрямую в цифровую архитектуру предприятия. Новые версии DMN позволяют задавать сложные выражения (через язык FEEL), расширяя рамки моделирования и переходя от ручных к полностью автоматизированным решениям. Эти факторы делают DMN перспективным инструментом бизнес-анализа и принятия решений в эпоху цифровой трансформации. DMN даже включён в отраслевые методологии бизнес-анализа (BABOK v3), что подчёркивает его значимость и потенциал для унификации подходов к управлению бизнес-правилами.

Литература

1. Designing a decision service using DMN models // Red Hat URL: docs.redhat.com (дата обращения: 21.11.2025).

Н.С. Панкратов, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ AGILE-КУЛЬТУРЫ

Микросервисная архитектура переориентирует команды и процессы разработки. Система разбивается на небольшие независимые сервисы, за каждый из которых отвечает отдельная кросс-функциональная команда. Это уменьшает зависимости между модулями и ускоряет выпуск новых функций, команды могут независимо разрабатывать, тестировать и развертывать свои сервисы. Такой подход сочетается с DevOps – команды берут на себя полный жизненный цикл продукта от кода до эксплуатации. Автоматизация развертывания (CI/CD) в микросервисной среде освобождает разработчиков от рутинных задач тестирования и интеграции, позволяя им сосредоточиться на создании бизнес-ценности.

В результате микросервисы, Agile и DevOps образуют эффективную триаду — небольшие независимые компоненты удобно разрабатываются итеративно, а быстрая поставка повышает адаптивность и инновационность организации. Однако такой подход требует зрелости процессов и культуры, команды должны уметь взаимодействовать и управлять множеством сервисов, чтобы избежать хаоса.

Проведенный анализ позволяет систематизировать ключевые проблемы перехода на микросервисы: координация между командами, мониторинг распределенной системы и управление данными. На основе этого можно рекомендовать поэтапное внедрение с первоначальным выделением стабильных бизнес-доменов. Перспективным направлением представляется интеграция микросервисов с сервис-мешами и использование AIOps для автономного управления инфраструктурой.

В итоге микросервисная архитектура стимулирует более гибкую и экспериментальную культуру разработки, но становится эффективной лишь при зрелом Agile-подходе и автоматизированном рабочем процессе. Согласно [1], микросервисы усиливают Agile-культуру компании, при переходе на микросервисный подход вместе с DevOps практиками скорость разработки может вырасти более чем на 30%.

Литература

1. What Are Microservices, And How Do They Aid Agile Development? // dotcms URL: dotcms.com (дата обращения: 21.11.2025).

*Ф.Н. Данилов, студ.; Т.С. Юлдошев, студ.;
рук. В.К. Денисенко, соиск. (НИУ «МЭИ»)*

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДОКУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В условиях цифровой трансформации организации и пользователи сталкиваются с ростом объемов неструктурированных текстовых данных. Ручная обработка требует значительных ресурсов и подвержена ошибкам, что создает потребность в универсальных и доступных инструментах автоматизации.

Разработан программный комплекс, интегрирующий задачи классификации и кластеризации документов. Новизна заключается в комбинированном подходе к извлечению признаков, использующем как текстовый контент, так и метаданные файлов. Архитектура системы модульная, что обеспечивает легкую интеграцию новых алгоритмов.

Проведен анализ современных методов машинного обучения, спроектирована и реализована модульная архитектура комплекса. Разработан механизм совместного использования текстовых признаков и метаданных. Проведено тестирование системы на тестовых выборках, показавшее высокие результаты точности.

Система может применяться для организации личных архивов и в корпоративной среде, например, для автоматической маршрутизации входящей документации [1]. Перспективы развития связаны с интеграцией облачных хранилищ и реализацией веб-интерфейса.

Литература

1. Интеллектуальная обработка документов (IDP) — обзор TAdviser [Электронный ресурс]. — URL: (дата обращения: 06.10.2025). — Текст: электронный.

*Ф.Н. Данилов, студ.; Т.С. Юлдошев, студ.;
рук. В.К. Денисенко, соиск. (НИУ «МЭИ»)*

УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ДОКУМЕНТОВ ЗА СЧЕТ КОМБИНАЦИИ КОНТЕНТА И МЕТАДАННЫХ

Эффективная классификация документов остается ключевой задачей управления корпоративной информацией. Традиционные текстовые методы часто недостаточны для сложных документов, что требует разработки гибридных подходов.

Предложен метод гибридной классификации, объединяющий анализ текстового контента (TF-IDF, n-граммы) и метаданных (размер, автор, тип файла) в едином конвейере обработки. Для интеграции разнородных признаков использована технология Feature Union с применением алгоритмов Random Forest и Logistic Regression [1].

Разработана архитектура системы, реализующая предложенный метод. Проведено сравнительное тестирование подходов, показавшее значительное улучшение точности классификации при использовании комбинированного метода по сравнению с базовыми решениями.

Метод может быть интегрирован в системы электронного документооборота и интеллектуальной обработки документов для автоматической маршрутизации и организации архивов. Дальнейшее развитие связано с использованием векторных представлений текста и расширенного спектра метаданных.

Литература

1. Векторные представления — что это такое, и почему в них важно разбираться [Электронный ресурс] // Хабр. — 2023. — URL: (дата обращения: 06.10.2025). — Текст: электронный.

А.М. Ульянова, студ.; рук. М.А. Дурова, асс. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТИПОЛОГИИ СТРАН ПО СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В работе проводится сравнительный анализ методов кластеризации при построении типологии стран на основе социально-экономических показателей [1]. Кластеризация рассматривается как инструмент первичного анализа данных, который позволяет выявить скрытые, нетривиальные группы стран со схожими характеристиками. Этот подход является основой для последующего более глубокого анализа на расширенных данных и может быть применен для прогнозирования социально-экономических рисков и аномалий [1].

В качестве алгоритма кластеризации был выбран Mean Shift [2]. Его преимущество — автоматическое определение количества кластеров, что исключает субъективный выбор количества кластеров.

Для оценки влияния различных групп признаков на качество кластеризации были сформированы три альтернативных набора данных, результаты представлены в таблице (табл. 1).

Таблица 1. Результаты кластеризации при разных наборах признаков

Набор признаков	Количество признаков	Найдено кластеров	Silhouette Score	Davies-Bouldin	Calinski-Harabasz
Дем.-геогр.	4	15	0.305	0.353	60.466
Кульг.-соц.	3	9	0.583	0.316	47.957
Полный стр-ый	7	16	0.406	0.381	31.307

Кластеризация показала, что наибольшая структурированность достигается при использовании культурно-социальных признаков. Полученные кластеры чётко отражают различия в языковом составе, уровне экономического неравенства и особенностях валютных систем, формируя осмысленные социально-экономические типы государств. Такой подход позволяет выявить естественные группировки стран, выходящие за рамки географического деления и отражающие реальные модели развития.

Литература

1. Качанова Н.Н., Глебкова И.Ю., Долбик-Воробей Т.А. Социально-экономическая статистика. Учебник для бакалавриата. М.: Юрайт, 2021.
2. Джордж К., Хасты Т., Тибширани Р., Фридман Дж. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. М.: Диалектика, 2023. 992 с. (разд. по K-means и Mean Shift).

*П. Коренюгина, студ., Ю.А. Накул, студ., Ю.Д. Поздняков, студ.;
рук. И.М. Крепков, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ КАСТОМИЗАЦИИ ОДЕЖДЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Современные тенденции цифровизации лёгкой промышленности и индустрии моды определяют потребность в инновационных подходах к персонализации продукции и взаимодействию с потребителем. Одним из наиболее перспективных направлений в этом контексте является применение технологий дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) для проектирования и кастомизации одежды [1].

AR-технологии позволяют совмещать цифровые объекты с реальной средой пользователя, обеспечивая интерактивную визуализацию изделий и возможность их изменения в режиме реального времени. Такой подход используется для кастомизации одежды — выбора цвета, фактуры, декоративных элементов и кроя непосредственно в цифровом пространстве. Интеграция AR-технологий в процесс проектирования и примерки способствует формированию уникального пользовательского опыта, снижению количества возвратов и росту вовлечённости клиентов.

Практическая реализация AR-сервисов требует объединения трёх ключевых компонентов:

- AR-движка (Unity, Unreal Engine, Spark AR), выполняющего визуализацию моделей;
- модуля компьютерного зрения, обеспечивающего точное распознавание фигуры пользователя;
- системы параметризации, позволяющей изменять элементы одежды в реальном времени.

Внедрение AR-платформ повышает эффективность продаж, усиливает индивидуализацию взаимодействия с клиентом и способствует развитию отечественных fashion-брендов в рамках цифровой экономики России.

Литература

1. **Панасенко С.В., Безпалов В.В., Стар И.А.** Интеграция возможностей технологии виртуальной примерки для совершенствования продаж в индустрии моды [Электронный ресурс] // Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2024. — № 3.

*Ф.Н. Данилов, студ.; Т.С. Юлдошев, студ.;
рук. В.К. Денисенко, соиск. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ

Высокий рост объемов пользовательского контента создает потребность в эффективной автоматической классификации текстов. Обработка таких данных сопряжена с проблемами разреженности признаков и недостатка контекста, что делает традиционные подходы, рассчитанные на большие документы, неэффективными.

В работе проведено сравнительное исследование эффективности пяти классических и современных методов машинного обучения на датасете текстов. Новизна заключается в анализе, учитывающем не только точность, но и устойчивость моделей к дисбалансу классов и семантической неоднозначности.

Был реализован план обработки данных, включавший нормализацию, токенизацию, удаление стоп-слов и лемматизацию. Для экспериментов были выбраны модели, наиболее релевантные для работы с текстом: Наивный Байес (NB), Логистическая регрессия (LR), Метод опорных векторов (SVM), Случайный лес (RF), а также Сверточная нейронная сеть (CNN) [1].

Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов классификации текстов

Критерий / Модель	NB	LR	SVM	RF	CNN
Средняя точность	0.82	0.89	0.91	0.85	0.88
F1-мера	0.78	0.87	0.89	0.83	0.86
Скорость обучения	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Объем данных	Низкие	Средние	Средние	Средние	Высокие

Работа показала, что модель SVM имеет лучший баланс точности и устойчивости. LR оказалась лучшим выбором с точки зрения соотношения точности и скорости работы.

Установленное преимущество линейных моделей делает их оптимальным выбором для задач, требующих высокой точности и стабильности при ограниченных вычислительных ресурсах.

Литература

1. **Захарова А.В.** Сравнение моделей и методов классификации текста // Инженерные исследования. — 2025. — Т. 26. — № 3.

*Ф.Н. Данилов, студ.; Т.С. Юлдошев, студ.;
рук. В.К. Денисенко, соиск. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СЛОВ НА ТОЧНОСТЬ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Автоматическое выделение тематик в текстовых коллекциях необходимо для анализа больших объемов данных. Традиционные методы тематического моделирования страдают от проблем семантической многозначности, что требует использования современных подходов к векторному представлению слов.

Проведено сравнительное исследование влияния трех методов векторного представления слов (Word2Vec, FastText, BERT) на качество тематического моделирования [2]. Была проведена оценка способности методов сохранять семантические связи между словами при построении тематических моделей. Для экспериментов использовался корпус научных статей на русском языке. Применены алгоритмы LDA и NMF в сочетании с векторными представлениями [1]. Личный вклад включает предобработку данных, настройку параметров моделей и оценку качества через метрики когерентности и интерпретируемости тематик.

Модели с BERT-эмбедингами показали наивысшую когерентность (0.55), превзойдя Word2Vec (0.48) и FastText (0.51). BERT также продемонстрировал лучшую устойчивость к многозначным словам, сохраняя семантическую целостность тематик.

Результаты могут быть использованы для улучшения систем интеллектуального анализа текстов, рекомендательных систем и аналитических платформ. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию вычислительной эффективности методов.

Литература

1. **Mikolov T.** Efficient Estimation of Word Representations // 2013.
2. **Батура Т.В.** Методы автоматической классификации текстов // Программные продукты и системы. — 2017. — № 1.

*М.А. Семенова, студ.; К.С. Карпачева, студ.;
рук. Н.Ю. Румасова, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НОРМАЛИЗАЦИИ В OLTP-СИСТЕМАХ

OLTP-системы выполняют большое количество коротких транзакций в реальном времени, поэтому для них критичны корректность, отсутствие дубликатов и целостность данных. Чтобы избежать аномалий обновления и избыточности, в таких системах применяются методы нормализации.

Нормализация — это процесс организации данных в логически связанных таблицах и приведение их к нормальным формам (1NF, 2NF, 3NF, BCNF). В OLTP-системах она помогает избавиться от избыточности данных и предотвращает аномалии при обновлении, обеспечивая целостность и однозначность информации. Основой нормализации является анализ функциональных зависимостей, который позволяет определить правильные ключи и структуру таблиц. Благодаря этому устраняется дублирование и снижается риск ошибок при внесении изменений [1].

Важную роль в поддержании согласованности данных играет обеспечение ссылочной целостности с помощью внешних ключей и каскадных операций. Это гарантирует, что связи между таблицами остаются корректными даже при большом количестве одновременно выполняемых транзакций. Такие методы широко применяются в банковских, торговых и CRM-системах, для обеспечения устойчивости и надежности работы базы данных.

При этом чрезмерная нормализация может замедлять работу из-за увеличения числа JOIN-операций, поэтому в OLTP-практике чаще всего используется нормализация до 3NF или BCNF, что обеспечивает баланс между скоростью транзакций и качеством данных.

Таким образом, применение методов нормализации в OLTP-системах позволяет уменьшить избыточность, предотвратить аномалии и обеспечить устойчивость транзакционной обработки, делая нормализацию ключевым инструментом проектирования таких систем.

Литература

1. **Н.А. Кривошеева, М.Г. Таспаева** Базы данных: теория нормализации: методические указания. — Оренбург: Оренбургский государственный университет (ОГУ), 2021. — С. 12–38.

*Ф.Н. Данилов, студ.; Т.С. Юлдошев, студ.;
рук. В.К. Денисенко, соиск. (НИУ «МЭИ»)*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДОБУЧЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕФЕРИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

Автоматическое реферирование научных статей является важным инструментом для сокращения времени обработки информации в условиях растущего объема публикаций. Особую сложность представляет сохранение смысловой целостности и ключевых положений исходного текста, что требует применения современных методов обработки естественного языка.

Была исследована эффективность моделей BERT и ruBERT для экстрактивного реферирования научных текстов на русском и английском языках. Новый подход заключается в адаптации архитектуры трансформеров и разработке специального пайплайна для выделения наиболее значимых предложений из академических публикаций различной тематической направленности.

Разработан комплексный план обработки научных статей, включающий этапы предобработки текста, сегментации на предложения и извлечения ключевых фрагментов через предобученные модели BERT и ruBERT. Личный вклад включает создание размеченного датасета научных статей, модификацию архитектуры моделей для задач экстрактивного реферирования и комплексную оценку качества рефератов с использованием метрик ROUGE.

Эксперименты показали, что ruBERT демонстрирует хорошие результаты на русскоязычных текстах (ROUGE-L: 0,62), тогда как BERT лучше справляется с англоязычными статьями (ROUGE-L: 0,58). Обе модели значительно превосходили традиционные методы реферирования, показав улучшение качества на 15–20% по различным метрикам [1]. Анализ результатов подтвердил эффективность трансформерных архитектур для сохранения семантической целостности исходных текстов.

Разработанное решение может быть успешно интегрировано в системы научного поиска и аналитические платформы для автоматизации обработки академических публикаций. Перспективы развития включают разработку гибридных абстрактных методов реферирования и адаптацию моделей для различных научных доменов.

Литература

1. **Devlin J.** BERT: Pre-training // 2019.

С.А. Морозкин, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ НА МЕТОД ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

При решении практических задач классификации, например, диагностики оборудования или оценки кредитных рисков, данные часто содержат признаки с несопоставимыми масштабами: один измеряется в единицах, другой — в тысячах. Использование таких данных без предварительной обработки искажает геометрию признакового пространства и приводит к неустойчивым, неточным моделям, особенно при использовании алгоритмов, чувствительных к расстояниям.

Ярким примером такого алгоритма является метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) — алгоритм обучения с учителем, изначально предназначенный для решения задач бинарной классификации. Его задача заключается в нахождении границы четкого разделения классов. Четкость границы определяется ее шириной — расстоянием между ближайшими к границе точками в каждом классе вдоль линии, перпендикулярной границе. Эти точки называются опорными векторами [1]. В случае неразделимых данных вводится штраф за ошибки, а при нелинейной разделимости применяются ядерные функции, позволяющие работать в пространствах высокой размерности, где данные уже становятся разделимыми.

Для устранения искажения результатов работы алгоритма применяется нормализация признаков. Стандартным подходом для SVM является Z-нормализация (стандартизация), при которой каждый признак преобразуется так, чтобы его среднее значение стало равным нулю, а стандартное отклонение — единице. Это приводит все переменные к единому масштабу и позволяет алгоритму корректно оценивать вклад каждого признака в построение разделяющей границы.

Таким образом, нормализация данных является необходимым условием корректной работы SVM в реальных задачах, напрямую влияющим на точность и надежность классификации.

Литература

1. **Просиз, Дж.** Прикладное машинное обучение и искусственный интеллект для инженеров: Пер. с англ. — Астана: АЛИСТ, 2024. — 432 с.

*С.А. Морозкин, студ.; И.Д. Рябов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДАННЫХ ЧЕРЕЗ ТЕХНОЛОГИЮ OPC: РОЛЬ В АРХИТЕКТУРЕ СОВРЕМЕННЫХ SCADA-СИСТЕМ

В современных SCADA-системах (Supervisory Control and Data Acquisition) — программно-аппаратных комплексах, предназначенных для мониторинга и управления технологическими процессами в реальном времени, возникает критическая проблема: оборудование от разных производителей использует несовместимые протоколы и форматы данных. Это делает прямую интеграцию устройств в единую систему чрезвычайно сложной, поскольку каждому клиентскому приложению пришлось бы реализовывать поддержку десятков промышленных протоколов, что ведет к росту затрат, снижению надежности и усложнению сопровождения.

Для преодоления этой проблемы была разработана специальная технология OPC (OLE for Process Control), в современном виде представленная стандартом OPC UA (Unified Architecture). Она предполагает использование OPC-сервера — промежуточного программного компонента, который абстрагирует клиентские приложения от особенностей конкретных протоколов и предоставляет единый интерфейс доступа к данным.

Взаимодействие OPC-сервера с оборудованием осуществляется через драйверы, поддерживающие соответствующие промышленные протоколы. Эти протоколы реализуются поверх различных физических сред — от последовательных интерфейсов (например, RS-485) до Ethernet. Многие современные промышленные стандарты, включая OPC UA, работают поверх стека TCP/IP [1], что обеспечивает совместимость с корпоративными сетями и упрощает интеграцию.

Литература

1. **Титаев, А.А.** Промышленные сети: учебное пособие / Титаев, А.А.; Мин-во науки и высшего образования РФ — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020 — 124 с.

С.А. Морозкин, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

СУТЬ, ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ПОДХОДА SAAS КАК МОДЕЛИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ БИЗНЕСА

Традиционная модель приобретения программного обеспечения, основанная на одновременной покупке лицензии, локальной установке и самостоятельном сопровождении, создает значительные барьеры для бизнеса: высокие капитальные затраты, длительные сроки внедрения, сложность масштабирования и необходимость поддерживать собственную ИТ-инфраструктуру. Эти ограничения особенно остро ощущаются малыми и средними предприятиями, которым требуется гибкость и оперативность в меняющихся рыночных условиях.

В качестве ответа на эти вызовы на смену традиционному подходу приходит модель программного обеспечения как услуги (Software as a Service, SaaS) [1]. В этой парадигме приложение размещается на инфраструктуре поставщика и предоставляется пользователям по подписке через веб-браузер или API, полностью снимая с клиента бремя установки, обновления и эксплуатации.

Ключевые особенности SaaS, такие как многопользовательская архитектура (один экземпляр приложения обслуживает множество клиентов), централизованные обновления (новые функции мгновенно доступны всем пользователям без локального вмешательства) и глобальная доступность при наличии Интернет-соединения, напрямую устраняют недостатки классической модели.

Развитие данной облачной модели стало возможным благодаря совокупности технологических факторов (распространение широкополосного интернета, зрелость веб-технологий, появление надежных облачных платформ) и экономических тенденций: стремления компаний снизить капитальные затраты, повысить предсказуемость операционных расходов и ускорить цифровую трансформацию с минимальными временными издержками.

Литература

1. **Golding, T.** Building Multi-Tenant SaaS Architectures / Tod Golding. — Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2024.

С.А. Морозкин, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА В ЗАДАЧАХ ФИЛЬТРАЦИИ СПАМА

Современные Интернет-пользователи ежедневно получают сотни электронных писем, значительная часть которых — нежелательная реклама, фишинг или мошенничество. Ручная фильтрация такого потока не только нереалистична, но и чревата пропуском важных сообщений или, наоборот, блокировкой легитимной корреспонденции. Возникает необходимость в автоматизированной, быстрой и масштабируемой системе, способной с высокой степенью точности отличать спам от обычной почты.

В качестве одного из эффективных решений этой задачи можно применить наивный байесовский классификатор — метод машинного обучения с учителем, основанный на теореме Байеса. Модель обучается на размеченном наборе писем («спам» / «не спам») и представляет каждое письмо как набор слов, предполагая их условную независимость — отсюда и термин «наивный» [1].

Согласно теореме Байеса, классификатор вычисляет апостериорную вероятность принадлежности письма к каждому классу на основе вероятности появления наблюдаемых слов при условии принадлежности к этому классу (правдоподобие), априорной вероятности самого класса и полной вероятности появления слов. Письмо относится к тому классу, для которого апостериорная вероятность выше.

Однако при наличии в новом письме слов, не встречавшихся в обучающей выборке, соответствующая условная вероятность становится нулевой, что потенциально влечет за собой обнуление всей оценки класса. Для устранения этой проблемы применяется сглаживание Лапласа, гарантирующее ненулевые вероятности для всех слов и тем самым обеспечивающее устойчивость модели к разреженным и неполным данным, типичным для реальных сценариев фильтрации спама.

Литература

1. **Прозиз, Дж.** Прикладное машинное обучение и искусственный интеллект для инженеров: Пер. с англ. — Астана: АЛИСТ, 2024. — 432 с.

С.А. Морозкин, студ.; рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)

АЛГОРИТМ СОПОСТАВЛЕНИЯ ТОВАРНЫХ НОМЕНКЛАТУР НА ОСНОВЕ КОСИНУСНОГО СХОДСВА ИХ ВЕКТОРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В B2B-сегменте существует несколько слабаразрешенных проблем, одной из которых является приведение к единому стандарту и сопоставление товарных номенклатур из разных источников данных (ERP, CRM, Excel-отчеты, данные контрагентов). Суть проблемы заключается в трудоемкости, высоком уровне временных затрат и подверженности ошибкам в процессе ручного сопоставления. Данный процесс влечет за собой риски сбоя в цепочках поставок, ошибок в аналитике, перерасхода бюджета и нарушений в финансовом учете.

Для автоматизации и повышения точности сопоставления номенклатур целесообразно применять методы обработки естественного языка (NLP), в частности — векторное представление текстовых наименований и оценку их семантической близости. Основная идея заключается в том, чтобы, предварительно проведя предобработку текста, преобразовать каждое наименование товара в числовой вектор (эмбединг) [1], отражающий его смысловое содержание, а затем измерить степень схожести между векторами различных записей.

Наиболее распространенной мерой близости векторов в задачах сопоставления текстов является косинусное сходство — скалярное произведение нормированных векторов: чем ближе значение к 1, тем выше семантическая близость наименований.

На практике пары номенклатур, для которых косинусное сходство превышает заданный порог (например, 0.85), автоматически считаются совпадающими или становятся кандидатами на ручную проверку. Такой подход значительно снижает объем рутинной работы, повышает воспроизводимость результатов и минимизирует риск человеческой ошибки.

Литература

1. **Просиз, Дж.** Прикладное машинное обучение и искусственный интеллект для инженеров: Пер. с англ. — Астана: АЛИСТ, 2024. — 432 с.

*Т.С. Юлдошев, студ.; Ф.Н. Данилов, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В SQL С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТИЧНЫХ ИНДЕКСОВ

Частичные индексы — это эффективный механизм оптимизации запросов, применяемый для ускорения операций фильтрации в предложении WHERE. Однако практическое применение данного инструмента выходит за рамки стандартного использования и может быть успешно применено для оптимизации операций соединения таблиц с селективными условиями [1].

Примером создания частичного индекса является следующий оператор:
CREATE INDEX idx_active_users ON users(id) WHERE active = true;

Особенность функционирования частичных индексов заключается в способности оптимизатора СУБД распознавать и использовать их в случаях, когда условие фильтрации интегрировано в предложение JOIN, а не размещено в основном блоке WHERE.

Для демонстрации практической эффективности методики рассмотрим ситуацию с таблицей журналирования событий (logs), где архивные записи составляют 95% общего объема данных, а актуальные записи — лишь 5%. Стандартный запрос соединения:

```
SELECT u.id, l.event FROM users u  
JOIN logs l ON l.user_id = u.id AND l.is_archived = false;
```

Применение обычного индекса по идентификатору пользователя демонстрирует низкую эффективность вследствие значительного объема индексируемых данных. Оптимальным решением становится создание частичного индекса:

```
CREATE INDEX idx_logs_active ON logs(user_id)  
WHERE is_archived = false;
```

Данный подход обеспечивает значительный прирост производительности: размер индекса сокращается в 20–30 раз благодаря селективности условия, что повышает эффективность кэширования, изменяет планы запросов в пользу индексного сканирования и ускоряет выполнение операций соединения до уровня, характерного для баз данных с хранением данных в оперативной памяти.

Функциональность индекса сохраняется даже при отсутствии условия фильтрации в SELECT, достаточно его указания в ON-условии соединения. Методика особенно эффективна для крупных редко обновляемых таблиц, где регулярно запрашивается лишь небольшой сегмент актуальных данных.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

*Т.С. Юлдошев, студ.; Ф.Н. Данилов, студ.;
рук. Е.А. Пичугина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ АГРЕГАТНЫХ ЗАПРОСОВ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ FILTER ВМЕСТО CASE WHEN

При работе с агрегатными функциями в SQL разработчики часто сталкиваются с необходимостью условного подсчета или суммирования данных [1]. Традиционным подходом является использование конструкций CASE WHEN внутри агрегатных функций:

```
SELECT  
    COUNT(*) AS total_users,  
    SUM(CASE WHEN is_active THEN 1 ELSE 0 END) AS active_users,  
    SUM(CASE WHEN status = 'paid' THEN amount ELSE 0 END) AS total_revenue  
FROM users;
```

Однако существует более элегантное и читаемое решение — использование предложения FILTER, которое позволяет явно указать условие фильтрации для агрегатной функции:

```
SELECT  
    COUNT(*) AS total_users,  
    COUNT(*) FILTER (WHERE is_active) AS active_users,  
    SUM(amount) FILTER (WHERE status = 'paid') AS total_revenue  
FROM users;
```

Повышение читаемости кода достигается за счет явного разделения агрегатной функции и условия фильтрации. Синтаксис становится более интуитивно понятным и менее перегруженным по сравнению с вложенными конструкциями CASE WHEN.

Упрощение сопровождения кода особенно заметно при необходимости расчета множественных показателей с различными условиями в рамках одного запроса. Отсутствие дублирования сложных условий уменьшает вероятность ошибок и упрощает модификацию запросов.

С точки зрения производительности, современные системы управления базами данных эффективно оптимизируют запросы с FILTER, обеспечивая сравнимую или лучшую производительность относительно эквивалентных конструкций с CASE WHEN.

Применение предложения FILTER для агрегатных функций представляет собой современный подход к написанию читаемых и эффективных SQL-запросов, соответствующих актуальным стандартам и лучшим практикам разработки.

Литература

1. **Туманов В.Е.** Хранилища данных. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 408 с.

*Т.С. Юлдошев, студ., К.С. Баланев, асп.;
рук. Ю.С. Бехтин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

В ходе подготовки ИТ-специалистов особое внимание уделяется дисциплинам, связанным с машинным обучением, среди которых важное место занимает курс «Исследование операций и методы оптимизации», на котором изучают алгоритмы численной оптимизации, такие как градиентный спуск или метод Ньютона [1], которые применяются при обучении моделей с учителем для минимизации функции ошибки. Традиционное изложение этих методов часто сопровождается большим количеством формул и сложных математических преобразований, что затрудняет восприятие материала студентами.

Одним из эффективных способов облегчить понимание принципов работы данных методов является их визуализация на графике. Наглядное представление траектории спуска, скорости сходимости и реакции алгоритма на различные параметры позволяет преподавателю более ясно объяснить суть происходящих процессов, а студентам — сформировать интуитивное понимание работы метода.

Для решения данной задачи было разработано приложение с графическим интерфейсом на языке Python, которое поддерживает визуализацию различных методов оптимизации [2], предоставляя возможность гибко настраивать параметры: задавать произвольную целевую функцию, выбирать критерий останова, изменять начальную точку и настраивать скорость сходимости. Это позволяет демонстрировать особенности поведения методов в различных условиях, сравнивать их эффективность и исследовать влияние параметров на процесс сходимости.

В результате ожидается, что разработанное приложение будет внедрено в учебный процесс в рамках дисциплины «Исследование операций и методы оптимизации». Наглядность и интерактивность инструмента повысит качество усвоения материала, позволит студентам лучше понимать принципы работы алгоритмов оптимизации и их роль в обучении моделей.

Литература

1. **Марчелло Л.Р.** Продвинутые алгоритмы и структуры данных. — СПб.: Питер, 2024. — 848 с.
2. **Хайнеман Д.** Алгоритмы. С примерами на Python. — СПб.: Питер, 2023. — 304 с.

*Т.С. Юлдошев, студ., О.В. Жнякин, соиск.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ПЛАНА ЗАПРОСА В ТРЕНАЖЕРЕ ПО SQL

Современные крупные компании оперируют огромными массивами информации, хранящимися в корпоративных хранилищах данных. При таких объемах данных критически важно обеспечивать высокую эффективность SQL-запросов, используемых в процессах работы с данными. Некорректно оптимизированные запросы могут приводить к существенному увеличению времени выполнения процедур обработки данных, повышенному потреблению ресурсов и снижению общей производительности информационных систем.

В рамках дисциплины «Введение в SQL» для обучения студентов используется интерактивный веб-тренажер. Одним из важных навыков, формируемых в процессе обучения, является умение писать эффективные SQL-запросы. Для тренировки этих навыков в тренажере была реализована возможность задавать ограничения к плану запроса, такие как полная стоимость запроса, стоимость его запуска или максимально допустимое время выполнения. Таким образом, для решения задачи с установленными ограничениями важно не только написать корректный запрос, который возвращает нужные данные, но и добиться его оптимального выполнения.

Для реализации данной функциональности был использован механизм СУБД Postgres, позволяющий экспортировать план запроса в машиночитаемый формат JSON, который далее анализируются при помощи расширенного синтаксиса SQL — SQL/JSON, что позволяет извлекать нужные параметры, сравнивать их с заданными ограничениями и делать вывод о соответствии решения требованиям задачи [1].

Использование подобного продвинутого подхода в образовательном процессе позволяет студентам глубже понимать влияние структуры и содержания SQL-запросов на план выполнения запроса движком СУБД.

В результате ожидается, что использование автоматизированного анализа плана запроса повысит качество обучения и поможет подготовить специалистов, способных эффективно работать с большими объемами данных и оптимизировать сложные SQL-процедуры.

Литература

1. **Рогов Е.В.** PostgreSQL 17 изнутри. — М.: ДМК Пресс, 2025. — 668 с.

*М.А. Нефедоров, студ., А.П. Бабешко, студ.;
рук. В.К. Денисенко, ассист. (НИУ «МЭИ»)*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В последние годы информационные системы для управления бизнес-процессами претерпевают качественные изменения под влиянием трёх факторов: облачной инфраструктуры, машинного обучения и быстрой разработки. Совмещение этих направлений позволяет предприятиям ускорять цифровую трансформацию, снижать затраты и адаптировать процессы к изменениям рынка [1].

Одной из ключевых тенденций является гиперавтоматизация. Она подразумевает автоматизацию рутинных операций через оркестрацию роботов, интеграцию AI-модулей и подключение к ERP/CRM-системам. Такой комплексный подход повышает эффективность и сокращает долю ручного труда.

Современные платформы дают возможность бизнес-пользователям прототипировать и внедрять процессы без глубокой технической экспертизы, что ускоряет вывод решений на рынок.

Важным направлением развития стала аналитика в реальном времени. Аналитические движки выявляют узкие места и контролируют ключевые показатели по потокам исполнений, что важно для создания адаптивных организаций. Появление зрелых платформ для process-mining делает управление процессами объективно измеримым и более управляемым.

Применение машинного обучения для предиктивной аналитики, оптимизации расписаний и формирования автоматизированных рекомендаций представляет следующую ступень зрелости BPM-решений. Это повышает требования к качеству управления данными и общему уровню безопасности систем.

Предприятиям для успеха рекомендуется сделать несколько шагов. Во-первых, формализовать процессы и метрики. Во-вторых, внедрить облачные модули и low-code-инструменты. В-третьих, развивать внутренние компетенции в области process-mining и машинного обучения для перехода к предсказательной оптимизации. Таким образом, наиболее успешные организации будут те, которые сумеют сочетать гибкость современных платформ с ответственным подходом к управлению данными.

Литература

1. Unlocking success in digital transformations // McKinsey & Company URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/people-and-organizational-performance/our-insights/unlocking-success-in-digital-transformations> (дата обращения: 21.10.2025).

*В.М. Вишняков, студ.; Д.А. Райков, студ.;
рук. В.К. Денисенко асс. (НИУ «МЭИ»)*

Nx: ПРОДВИНУТАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОНОРЕПОЗИТОРИЯМИ

Nx представляет собой комплексную систему сборки и инструментарий для работы с монорепозиториями, обеспечивающую интеллектуальное кэширование, автоматизацию процессов и интеграцию с современными фреймворками. В контексте управления сложными проектами, где монорепозиторий можно сравнить с крупным административным комплексом, Nx функционирует как высокоорганизованная система управления, которая точно определяет области изменений и выполняет избирательные обновления соответствующих модулей [1].

Технология Nx обеспечивает эффективное управление монорепозиториями за счёт реализации механизма анализа зависимостей, который идентифицирует и выполняет операции только с модифицированными компонентами проекта. Распределённая система кэширования позволяет повторно использовать результаты предыдущих сборок, что значительно сокращает время разработки. Инструментарий включает возможности автоматизированной генерации кода по установленным шаблонам, обеспечивая стандартизацию и ускорение создания новых проектных элементов. Визуализация рабочего пространства предоставляет наглядное представление о взаимосвязях между различными компонентами системы.

Платформа Nx получила широкое признание в индустрии, находя применение в крупных технологических корпорациях, включая Google, Microsoft, Adobe и Cisco. Эти организации используют Nx для координации разработки сотен приложений и библиотек в рамках единой кодовой базы. Более двадцати тысяч коммерческих организаций интегрировали Nx в свои процессы разработки.

Nx революционизирует подход к работе с монорепозиториями, устраняя традиционные сложности управления масштабными проектами. Платформа демонстрирует устойчивую эффективность при расширении проектов от минимального до значительного количества компонентов, обеспечивая согласованность процессов и контроль над зависимостями на всех этапах разработки.

Литература

1. **Монорепозитории NX и Lerna, или Туда и обратно** // Хабр URL: <https://habr.com/ru/articles/520186/?ysclid=mihhph0gpg979597082> (дата обращения: 20.11.2025).

*В.М. Вишняков, студ.; Д.А. Райков, студ.;
рук. В.К. Денисенко асс. (НИУ «МЭИ»)*

ESBUILD: ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ СБОРЩИК ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ВЕБ-РАЗРАБОТКИ

Esbuild представляет собой высокоскоростной инструмент для сборки и минификации JavaScript и TypeScript. Его ключевым преимуществом является исключительная производительность, обеспечиваемая реализацией на языке Go, который компилируется в нативный машинный код. Это позволяет ему превосходить по скорости обработки традиционные решения, такие как Webpack, Parcel и Rollup, в десятки и сотни раз. Если традиционные сборщики аналогичны ручной обработке, то esbuild функционирует как высокоскоростная автоматизированная система, выполняющая операции за время, исчисляемое миллисекундами.

Благодаря архитектуре, ориентированной на производительность, сборка проектов выполняется практически мгновенно, что кардинально сокращает цикл разработки. Инструмент включает мощный встроенный минификатор кода, не требующий подключения дополнительных модулей. Наряду с высокой скоростью работы, esbuild обеспечивает полную поддержку современных модульных систем ESM и CommonJS, что позволяет использовать его в разнородных проектах [1].

Широкое распространение esbuild подтверждается его интеграцией в популярные фреймворки и сборщики. Например, инструмент используется в Vite для работы сервера разработки, а также применяется в таких решениях, как Remix, SvelteKit и Astro, для production-сборок. Это делает esbuild фактическим стандартом производительности в современной веб-экосистеме.

Внедрение esbuild позволяет полностью исключить традиционные задержки, связанные с ожиданием сборки, и устанавливает новый стандарт эффективности в организации рабочего процесса веб-разработки.

Литература

1. **Webpack vs esbuild** — уже можно использовать в production? // Хабр URL: <https://habr.com/ru/articles/773236/?ysclid=mihhhtpozp244150229> (дата обращения: 20.11.2025).

*В.М. Вишняков, студ.; Д.А. Райков, студ.;
рук. В.К. Денисенко асс. (НИУ «МЭИ»)*

STORYBOOK: ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ И ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Storybook представляет собой специализированную платформу для разработки и документирования UI-компонентов в изолированной среде, независимо от бизнес-логики основного приложения. Данный подход можно сравнить с функционированием выставочного зала мебели, где существует возможность детального изучения каждого элемента обстановки — стула, дивана или стола — с различных ракурсов и в различных конфигурациях, без необходимости посещения реального жилого помещения [1].

Основной функционал Storybook обеспечивает изолированную среду разработки компонентов, что позволяет проектировать и тестировать элементы интерфейса в отрыве от контекста основного приложения. Платформа автоматически генерирует комплексную документацию с примерами использования компонентов. Инструмент поддерживает возможности визуального тестирования, включая создание скриншотов и регрессионное тестирование интерфейсов. Storybook демонстрирует кроссплатформенную совместимость с большинством современных фронтенд-фреймворков, включая React, Vue, Angular, Svelte и Web Components.

Storybook получил широкое распространение в индустрии разработки программного обеспечения. Крупные технологические компании, такие как Airbnb, Atlassian, GitHub и Shopify, успешно применяют данный инструмент для создания и поддержки дизайн-систем. Статистические данные свидетельствуют о внедрении Storybook в более чем 80 тысячах коммерческих организаций при общей аудитории пользователей, превышающей 13 миллионов разработчиков.

Storybook представляет собой специализированную среду для проектирования пользовательских интерфейсов, обеспечивающую методологию компонентного подхода в веб-разработке. Инструмент позволяет создавать и тестировать UI-компоненты в контролируемых условиях с последующим интеграционным использованием в производственных приложениях.

Литература

1. Storybook: разработка без боли для команды и бизнеса. Возможности и нюансы // Хабр URL: <https://habr.com/ru/companies/simbirsoft/articles/729066/?ysclid=mihhuk8mks773243364> (дата обращения: 20.11.2025).

*А.Н. Кошелев, студ.; К.Э. Привалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ АГРЕГАТНЫХ ЗАПРОСОВ: FILTER ВМЕСТО CASE WHEN

В современных аналитических запросах часто требуется вычислять агрегатные функции по условию. Классический подход с использованием CASE WHEN внутри SUM или COUNT приводит к громоздкому и менее читаемому коду [1]. Более элегантной альтернативой является конструкция FILTER (WHERE ...), поддерживаемая большинством современных СУБД.

Сравним два подхода: требуется получить общее количество пользователей, количество активных пользователей и сумму успешных платежей.

Традиционный вариант с CASE WHEN:

```
SELECT
```

```
    COUNT(*) AS total_users,
```

```
    COUNT(CASE WHEN is_active THEN 1 END) AS active_users,
```

```
    SUM(CASE WHEN status = 'paid' THEN amount ELSE 0 END) AS total_revenue
```

```
FROM users;
```

Современный вариант с FILTER:

```
SELECT
```

```
    COUNT(*) AS total_users,
```

```
    COUNT(*) FILTER (WHERE is_active) AS active_users,
```

```
    SUM(amount) FILTER (WHERE status = 'paid') AS total_revenue
```

```
FROM users;
```

Конструкция FILTER существенно повышает читаемость кода, явно отделяя условие от агрегатной операции. Логика становится интуитивно понятной: «выполнить агрегацию ТОЛЬКО там, ГДЕ выполняется условие». Это упрощает анализ сложных запросов и снижает вероятность ошибок.

Внедрение FILTER в агрегатных запросах способствует написанию чистого, выразительного и легко поддерживаемого SQL-кода, что особенно важно в сложных аналитических задачах.

Литература

1. Самоучитель SQL // Яндекс Практикум Блог URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/samouchitel-sql/> (дата обращения: 01.12.2025).

*А.Н. Кошелев, студ.; К.Э. Привалов, студ.;
рук. В.К. Денисенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПОИСК ПО ТЕКСТУ В SQL

Использование LIKE '%текст%' для поиска приводит к полному сканированию таблицы, что становится критичным на больших данных [1].

Решение — полнотекстовый поиск PostgreSQL:

```
CREATE TABLE articles (  
  id serial PRIMARY KEY,  
  title text,  
  body text  
);
```

-- Создаём специализированный индекс

```
CREATE INDEX idx_articles_fts ON articles  
  USING gin (to_tsvector('russian',  
    coalesce(title, '') || ' ' || coalesce(body, '')));
```

Быстрый поиск:

```
SELECT id, title  
FROM articles  
WHERE to_tsvector('russian',  
  coalesce(title, '') || ' ' || coalesce(body, ''))  
  @@ plainto_tsquery('russian', 'sql поиск');
```

Полнотекстовый поиск работает в сотни раз быстрее, поддерживает морфологию русского языка, ранжирование результатов и сложные запросы с операторами AND/OR/NOT.

Аналоги в других СУБД: MySQL — FULLTEXT индекс, SQLite — FTS5, SQL Server — CONTAINS.

Переход на полнотекстовый поиск превращает медленные операции в мгновенные запросы, что необходимо для современных приложений.

Литература

1. Самоучитель SQL // Яндекс Практикум Блог URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/samouchitel-sql/> (дата обращения: 01.12.2025).

Направление IV

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

**Electrical engineering,
electromechanics,
and electric technologies**

Руководитель направления:

Директор института электротехники
и электрофикации, к.т.н., доцент
Погребисский Михаил Яковлевич

Секция 22
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ
Electromechanical energy converters

Председатель секции: к.т.н., доцент Ширинский Сергей Владимирович

Секретарь секции: к.т.н. Сидоров Антон Олегович

*Т.С. Борукеев, Н.С. Нусупбеков, Н.Б. Бообеков,
КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика*

РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ МИКРО ГЭС ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Для труднодоступных и отдалённых регионов, где отсутствует централизованное энергоснабжение, одним из эффективных решений является применение микрогидроэлектростанций (микроГЭС), работающих на малых водотоках. Кыргызстан обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом: на территории страны насчитывается более 40 000 рек общей длиной около 150 000 км, что позволяет ежегодно использовать до 174 млрд кВт·ч потенциальной энергии. Однако существующие микроГЭС требуют сооружения специальных фундаментов и низконапорных плотин, что увеличивает их стоимость и срок окупаемости. Для повышения эффективности и снижения затрат предложена совмещённая конструкция прямоточной микроГЭС с торцевым асинхронным генератором и конденсаторным возбуждением. Конструкция включает корпус с входным конфузуром и выходным диффузором, осевую лопастную турбину и торцевой генератор. Лопасти турбины размещены на цилиндрическом водопроводе, который одновременно является ротором генератора. Такое решение позволяет максимально использовать кинетическую энергию потока воды, повышая коэффициент полезного действия установки. Предварительные расчёты показали, что предложенная схема обеспечивает повышение экономичности при сохранении высокого КПД и упрощении эксплуатации. Конструкция может применяться для автономного электроснабжения потребителей малой мощности без строительства плотин.

Ключевые слова: микроГЭС, асинхронный генератор, турбина, конфузор, диффузор, лопасти, возобновляемая энергия.

Д.С. Тарицын, асп.; рук. О.Н. Молоканов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧИ С МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ХАЛЬБАХА ДЛЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРИВОДОВ

В ряде устройств и машин, например, на тепловозах, требуется согласование частот вращения нескольких агрегатов, работающих от одного двигателя. Например, на тепловозах от дизельного двигателя приводятся компрессор, вентилятор охлаждения воды и масла, вентиляторы охлаждения тяговых электродвигателей, и каждый из агрегатов имеет собственную номинальную частоту вращения. Привод осуществляется через систему гидравлических и механических передач, или от вспомогательных электродвигателей [1, 2].

В таких приводах наблюдается снижение надежности, а значит, и рост расходов при периодическом обслуживании и ремонте.

Для решения задачи согласования частот вращения и высокоэффективной передачи мощности при достижении высокой надежности предлагается использовать для связи агрегатов в групповом высоконагруженном приводе бесконтактные магнитные передачи [3].

Однако при внедрении магнитных передач возникает сложность — необходимость достижения высокой компактности и разумной цены производства. В настоящем исследовании для повышения плотности момента и снижения цены активных материалов рассматривается возможность и перспективы внедрения магнитной системы Хальбаха [4].

Литература

1. **Филонов С.П., Зиборов А.Е., Ренкунас В.В. и др.** Тепловозы 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа. — М.: Транспорт, 1986. — 288 с., ил., табл.
2. **Филонов С.П., Гибалов А.И., Никитин Е.А. и др.** Тепловоз 2ТЭ116. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. — 334 с.
3. **Молоканов О.Н.** Разработка оптимальной конструкции и методов расчета бесконтактной магнитной передачи. — М.: на правах рукописи, 2017. — 153 с.
4. **L. Jian and K.T. Chau**, «A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays,» in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, 2010, pp. 319–328.

А.И. Абдуваитов, студ.;
рук. И.В. Бочкарев, д.т.н., проф. (КГГУ, Бишкек),
А.Р. Сандыбаева, к.т.н., доц. (КГГУ, Бишкек)



ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ НАГРЕВА ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В процессе работы любой электрической машины (ЭМ) она нагревается за счет выделяемых потерь. Наиболее уязвимыми в тепловом отношении являются ее обмотки, поэтому контроль их нагрева является чрезвычайно важной задачей. Существует различные способы прямого и косвенного контроля температуры обмоток ЭМ [1]. Однако их применение приводит к различным негативным явлениям: изменению режима работы ЭМ, возникновению дополнительных потерь в шунте и т.д. Для исключения этих недостатков предлагается контролировать температуру по углу сдвига φ между активной R и индуктивной X составляющими импеданса обмотки.

Известно, что удельное сопротивление меди и коэффициент магнитной проницаемости магнитопровода соответственно равны:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_\rho \cdot (T - T_0)]; \quad \mu = \mu_0 \cdot [1 - \alpha_\mu \cdot (T - T_0)], \quad (1)$$

где ρ_0 и μ_r — удельное сопротивление и магнитной проницаемости, отнесенные к начальной температуре T_0 ; α_ρ и α_μ — температурные коэффициенты удельного сопротивления и магнитной проницаемости; r и μ — удельное сопротивление и магнитная проницаемость при температуре T .

Поскольку R и X пропорциональны ρ и μ , то из (1) следует, что изменения R и X при воздействии на них температуры имеют разнонаправленные тренды. Тогда между углом φ и температурой T обмотки существует следующая зависимость:

$$\varphi = \arctg X/R = \arctg U_{\text{Im}}/U_{\text{Re}} = F(T). \quad (2)$$

Таким образом, контроль температуры обмотки ЭМ предлагается выполнять путем прямых измерений разности фаз j между векторами $\dot{U}$ и $\dot{I}$, зависящими от величин R и X , с последующей алгоритмической обработкой полученных результатов. Разработано устройство, имеющее два измерительных канала, в первом из которых выполняют синфазное синхронное детектирование напряжения питания обмотки U и получают сигнал U_{Im} , пропорциональный X , а во втором канале выполняют квадратурное синхронное детектирование и получают второй сигнал U_{Re} , пропорциональный R , и по (2) вычисляют температуру обмотки.

Литература

1. Бочкарев И.В., Брякин И.В., Гунина М.Г., Тузелбай Н.М. Разработка автоматизированной системы тепловой защиты асинхронных электродвигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2025. № 1(66). С. 39–48.

*Н.Б. Кудайбергенова, студ.;
рук. И.В. Бочкарев, д.т.н., проф. (КГГУ, Бишкек),
А.Р. Сандыбаева, к.т.н., доц. (КГГУ, Бишкек)*



РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Известно, что до 70% возможных отказов оборудования, работа которых сопровождается возникновением вибраций, можно определить путем контроля их механических колебаний. Существуют различные датчики виброконтроля, среди которых наиболее приоритетными являются динамические, работающие на принципе перемещения инерционного элемента (ИЭ) при изменении величины ускорения контролируемого объекта (КО) и генерирования электрического сигнала, пропорционального величине этого ускорения [1]. Для повышения метрологических свойств таких вибродатчиков предлагается в качестве элементов возбуждения использовать металлические электроды, которые возбуждают в цепях измерительных катушек на частоте последовательного резонанса электрические токи, которые создают переменные магнитные поля и наводят в ИЭ вихревые токи. За счет этого появляется переизлученное поле, которое наводит в измерительных обмотках соответствующие ЭДС взаимной индукции. Определяют разностную величину между ними, выделяют реактивную составляющую этой разностной величины, пропорциональную величине относительного перемещения КО и ИЭ, и вычисляют ускорение $g(t)$ перемещения КО:

$$g(t) = K_0^{-1} \cdot [\Delta U''_{lm}(t) + 2 \cdot \omega_0 \cdot \beta \cdot \Delta U'_{lm}(t) + \omega_0^2 \cdot \Delta U_{lm}(t)],$$

где $\Delta U_{lm}(t)$ — реактивная составляющая разностной величины между ЭДС взаимной индукции; $\Delta U'_{lm}(t)$ и $\Delta U''_{lm}(t)$ — первая и вторая производные реактивной составляющей $\Delta U_{lm}(t)$; K_0 — коэффициент измерительных преобразований; $\omega_0 = \sqrt{w/m}$ — собственная циклическая частота колебаний ИЭ; w — жесткость упругих элементов, m — масса ИЭ; β — степень затухания колебаний ИЭ.

Предложенный датчик, который осуществляет описанные процедуры, обладает повышенной чувствительностью, высокой термостабильностью, технологичностью и простотой конструкции. Разработана блок-схема аппаратной реализации системы контроля виброускорения электрооборудования с использованием данного датчика.

Литература

1. **Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р.** Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 39–49.

Р.К. Зарипов, асп.; рук. А.Е. Сидоров, доцент (КГЭУ, Казань)

РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАТРОНА ЛАМПОВОГО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА НАГРУЗКИ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Согласно ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2021, среди требований к параметрам электромагнитной совместимости электроприборов, особо выделяются нормы гармонических составляющих. Большое количество электроприборов со значительным уровнем эмиссии высших гармоник (ВГ) в низковольтных электросетях (ЭС), активно внедряемые в электрохозяйства (ЭХ), могут привести к нестабильной работе электроприборов и снижению их ресурса. Среди приборов с высоким уровнем ВГ отмечают светодиодные лампы, коэффициент нелинейных искажений (КНИ) тока нагрузки которых могут превышать 200% [1].

Применение ФКУ имеет ряд ограничений, связанных с их высокой стоимостью, неоднородностью характеристик ЭС и сложностью подбора оптимального метода для определённого участка [2].

Предложено решение по уменьшению эмиссии ВГ в ЭС светодиодными лампами применением ламповых патронов с расположенным в них плёночным конденсатором [3]. При этом максимально близкое расположение конденсатора к источнику ВГ способствует эффективному снижению значения КНИ тока нагрузки, уменьшает нагрузку на электропроводку и приборы сетей освещения, повышает общее качество электроэнергии в сетях ЭХ.

Литература

1. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Определение коэффициента мощности искажения нагрузок по номограмме на основе измерения КНИ по току // Практическая силовая электроника, № 4(88) 2022 г., с. 53–55.
2. Tukshaitov R., Zaripov R., Gibadullin R. Some factor constraining the development and implementation of power grid voltage harmonics in the power engineering of filter-compensating installation // E3S Web of Conferences. — 2023 — Vol. 470. p. 01023.
3. Зарипов Р.К. Патрон ламповый. Патент на изобретение № 2850133 от 05.11.2025 г.

И.Р. Сандыбаев, студ.;
рук. И.В. Бочкарев, д.т.н., проф. (КГГУ, Бишкек)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ



В робототехнике и станкостроении широко используют двигатели, имеющие встроенный фрикционный тормоз с электромагнитным приводом (ФТЭП) [1]. В процессе эксплуатации таких электроприводов двигателей необходимо иметь информацию о текущем состоянии ФТЭП. Для этого разработаны различные контактные и бесконтактные способы контроля.

Для расширения возможностей систем контроля предлагается использовать в качестве вихретокового датчика непосредственно сам электромагнит ФТЭП. Для этого на его обмотку, имеющую индуктивность L , через разделительный конденсатор C подают низковольтное ВЧ-напряжение, которое накладывают на рабочее высоковольтное низкочастотное напряжение питания обмотки, причем колебательный контур LC настраивают на резонансную частоту. За счет этого возбуждается зондирующее электромагнитное поле, которое в якоре ФТЭП индуцирует вихревые токи. Их величина зависит от положения якоря относительно магнитопровода электромагнита, а также от параметров якоря (от параметров его материала, от наличия дефектов и др.). Эти токи наводят в обмотке ЭДС, значение которой алгоритмическими методами разделяют на информацию о рабочих режимах ФТЭП и о текущем состоянии узлов ФТЭП, в частности, о положении якоря относительно магнитопровода. Разработана структурная блок-схема реализации предложенной системы контроля ФТЭП, приведено теоретическое обоснование.

Предложенная система контроля имеет расширенные эксплуатационные возможности и позволяет в зависимости от поставленных задач контроля регистрировать различные информативные параметры, непосредственно связанные с текущим состоянием ФТЭП и эффективно определять большинство видов эксплуатационных дефектов их элементов.

Данная системы контроля может быть также использована для любых электромагнитных механизмов, имеющих подвижные сердечники, например, для электромагнитных фрикционных муфт, электромагнитных клапанов, блокировочных устройств, тяговых электромагнитов и т.п.

Литература

1. **Бочкарев И.В., Ширинский С.В.** Расчет и конструирование асинхронных электродвигателей различных модификаций. — М.: Издательство МЭИ, 2025. — 240 с.

*Ньен Чан Наинг, студ.;
рук. С.В. Ширинский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СТАНКОВ С ЧПУ

Современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) представляют собой сложные мехатронные системы, в которых для обеспечения высокой точности, производительности и надежности используется комплекс различных типов специализированных электроприводов. Каждый тип привода оптимизирован для выполнения конкретных технологических задач в рамках единого производственного процесса. Основными типами приводов в станках с ЧПУ являются: главный привод (шпиндель), отвечающий за вращение режущего инструмента; приводы подач, обеспечивающие точное позиционирование по осям X, Y, Z; вспомогательные приводы, выполняющие функции смены инструмента, подачи охлаждающей жидкости и другие технологические операции.

Для реализации этих приводов применяются различные типы электрических машин. Асинхронные двигатели используются в мощных шпинделях и насосных системах благодаря своей надежности, простоте конструкции и способности выдерживать значительные перегрузки. Бесконтактные двигатели постоянного тока (BLDC) находят применение в высокоскоростных шпинделях и сервоприводах, обеспечивая высокий КПД и точное управление положением. Серводвигатели используются в приводах подач, где требуются максимальная точность позиционирования и динамические характеристики. Шаговые двигатели оптимальны для бюджетных решений и вспомогательных осей, обеспечивая простоту управления и достаточную точность позиционирования.

Выбор типа электрической машины определяется требованиями технологического процесса к точности, быстродействию и мощности. Для высокоскоростной обработки легких сплавов преимущественно применяются высокооборотные шпиндели на базе BLDC-двигателей. При обработке твердых материалов требуются асинхронные двигатели с большим запасом крутящего момента. Современные сервоприводы с цифровым управлением позволяют осуществлять сложные траекторные движения с микронной точностью. Интеграция различных типов электроприводов в единую систему управления обеспечивает согласованную работу всех узлов станка. Каждый тип электрических машин занимает свою нишу в конструкции станков с ЧПУ, обеспечивая оптимальное соотношение точности, производительности и стоимости для конкретных технологических задач. В работе исследуется применение разных типов электрических машин.

Литература

1. **Чернов Е.А., Кузьмин В.П.** Комплектные электроприводы станков с ЧПУ. — Горький: Волго-Вятское кн.изд-во, 1989.
2. Vazhacharickal, Prem & Kurian, Geevarghese & P, Aruna & Francis, Christeena & Joseph, Sunil. Electrical drives and control for automation. — Amazon Publishers, 2018.

Чжоу Юйли, студ.; рук. М.Г. Гунина, к.т.н., доц. (КГТУ, Бишкек)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ОДНОКРИСТАЛЬНОГО МИКРОКОМПЬЮТЕРА

Данная статья посвящена проектированию системы управления бесщеточным двигателем постоянного тока на основе однокристального микрокомпьютера AT89C52. Актуальность работы обусловлена широким применением таких двигателей в промышленности и быту, а также необходимостью внедрения интеллектуальных систем для повышения эффективности управления. В ходе исследования были проанализированы принципы работы и математическая модель двигателя, проведен обзор существующих решений, включая отказоустойчивые архитектуры и бездатчиковые методы управления. На основе этого была разработана аппаратная часть системы, включающая микроконтроллер, схемы управления, драйверы и модули ввода-вывода, а также реализовано программное обеспечение с использованием ШИМ-модуляции и ПИД-регулятора для управления скоростью и стабилизации работы.

Моделирование системы в средах Proteus и Keil C51 подтвердило её работоспособность и возможность выполнения таких функций, как регулировка скорости, реверс, остановка и интерактивное управление с отображением данных. Практическая значимость разработки заключается в её потенциальном применении в электромобилях, промышленных приводах и учебных целях. Несмотря на достигнутые результаты, авторы отмечают необходимость дальнейшего повышения чувствительности, стабильности и оптимизации компоновки системы, что определяет направления для будущих улучшений, таких как использование более современных микроконтроллеров и усовершенствованных алгоритмов управления.

Литература

1. **J.X. Weinert, C. Ma, X. Yang, C.R. Cherry.** "Electric two-wheelers in China — Effect on travel behavior mode shift and user safety perceptions in a medium-sized city", *Transp. Res. Rec.*, no. 2038, pp. 62–68, 2007.
2. **C. Cherry, R. Cervero.** "Use characteristics and mode choice behavior of electric bike users in China", *Transp. Policy*, vol. 14, no. 3, pp. 247–257, May 2007.
3. **Wildi T.** *Electrical Machine, Drives and Power systems*, Prentice Hall, NJ Columbus, Ohio. 1999.
4. **S. Lin, M. He, Y. Tan, M. He.** "Comparison study on operating speeds of electric bicycles and bicycles: Experience from field investigation in Kunming China", *Transp. Res. Rec. J Transp. Res. Board*, vol. 2048, no. 1, pp. 52–59, 2008.

Гоу Жуйже, студ.; рук. А.Р. Сандыбаева, доц. (КГТУ, Бишкек)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИНТЕГРАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ

Целью данной диссертации является исследование путей интеграции, ключевых технологий и практик применения электротехники и её систем автоматизации в контексте интеллектуального производства. Разработана трёхуровневая модель технической архитектуры, включающая «уровень интеллектуальных датчиков и исполнения», «уровень сетевой передачи и интеграции» и «уровень интеллектуального принятия решений и применения». Кроме того, разработана концептуальная основа «платформы цифрового моделирования интеллектуальной производственной линии». Исследование показывает, что благодаря глубокой интеграции информационных технологий нового поколения электротехника и её системы автоматизации могут значительно повысить гибкость, эффективность и надёжность производственных систем, выступая в качестве движущей силы будущей трансформации и модернизации обрабатывающей промышленности.

Литература

1. **Чжоу Цзи.** Интеллектуальное производство — основное направление программы «Сделано в Китае 2025» [Ж]. Chinese Engineering Science, 2015.
2. **Лю Фэй, Сунь Юсянь.** Текущее состояние и тенденции развития технологий промышленной автоматизации [Ж]. Acta Automatica Sinica, 2013.
3. **Ли Дж., Багери Б., Као Х.А.** Архитектура киберфизических систем для производственных систем на базе Индустрии 4.0 [Ж]. Manufacturing Letters, 2015.
4. **Ван Байцунь, И Бин, Лю Чжэньюй и др.** Исследование цифровых двойников и их применение [Ж]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018.

Дун Чэнбяо, асп.; рук. М.Г. Гунина, к.т.н., доц. (КГТУ, Бишкек)

КООРДИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ МИКРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Технология микросетей дополняет традиционные энергосистемы и способствует использованию возобновляемых источников энергии. Однако автономные микросети с высокой долей ветроэнергетики сталкиваются с серьезными колебаниями мощности, низкой инерцией и плохой стабильностью частоты. Существующие методы координированного управления фокусируются на различиях состояний между источниками энергии, но не учитывают их динамические физические характеристики. В данной работе мы анализируем различия электромеханических динамических характеристик между ВЭУ и синхронными генераторами с точки зрения физических механизмов. Мы предлагаем новый метод координированного управления частотой. В этом методе команда электромагнитной мощности ВЭУ полностью отделена от скорости ротора и регулирует выход только на основе изменений частоты системы. Синхронные генераторы используют отклонение скорости ВЭУ в качестве входа для поддержания стабильности скорости ротора. Теоретический анализ доказывает устойчивость предложенного метода. Частотный анализ подтверждает превосходную способность подавления возмущений мощности по сравнению с традиционными методами. Предложенный метод координированного управления обеспечивает новую теоретическую основу и технический подход для управления частотой в микросетях с высокой долей ветроэнергетики.

Работа должна охватывать три направления. Первое, расширить структуру координации на несколько ВЭУ и синхронных генераторов с распределенной реализацией. Второе, разработать механизмы переключения стратегий управления для сценариев сбоя связи для обеспечения надежной работы. Третье, провести всестороннюю оценку производительности при различных условиях эксплуатации, включая переменные профили ветра, изменения нагрузки и возмущения сети.

Литература

1. **L. Reese, A. Rettig, C. Jauch, R.J. Domin, T. Karshüning.** Joint frequency stabilisation in future 100% renewable electric power systems, *Energies* 18 (2), 2025.
2. **A.M. Bouzid, J.M. Guerrero, A. Cheriti.** A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 44 , 2015.

В.М. Костяков, студ.;
рук. С.В. Ширинский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С АКСИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

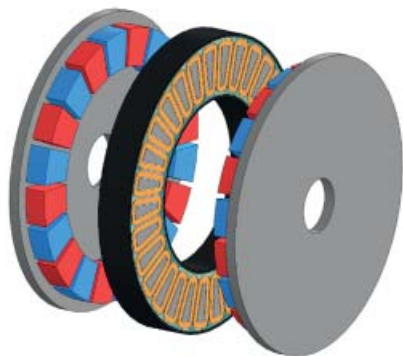


Рис. 1. 3-D модель аксиального двигателя

Развитие электрической авиации делает приоритетными электромеханические системы с повышенной удельной мощностью. Одним из перспективных решений являются синхронные двигатели с аксиальным магнитным потоком (СДАП), отличающиеся высокой плотностью момента, возможностью компоновки в ограниченном осевом пространстве и повышенным КПД [1].

В работе выполнено проектирование авиационного СДАП мощностью 600 кВт (взлётный режим) и 530 кВт (крейсерский режим) при частоте вращения 2400 об/мин, питаемого от трёх-

фазной сети 230/400 В, 400 Гц. Конструкция двигателя с аксиальным потоком построена на базе двухроторной топологии с постоянными магнитами N42SH и центральным статором, не использующим ярмо (рис. 1).

В качестве базовой выбрана трехфазная обмотка с $p = 10$, $q = 1$. Проверочный расчет проводился в 2D-модели FEMM [2], проверка адекватности модели проведена с помощью трехмерного полевого расчета двигателя. Последующая корректировка размеров постоянных магнитов проводилась с использованием векторной диаграммы синхронного двигателя.

С учетом полученного опыта для последующей оптимизации рекомендовано заняться автоматизацией параметрического расчёта синхронного двигателя на основе полевых моделей. Разработанный подход может быть использован при проектировании высокомоментных компактных электродвигателей для перспективных электрических летательных аппаратов.

Литература

1. Exploring the Differences: Axial vs. Radial Flux Machines [Электронный ресурс] — URL: <https://www.emworks.com/blog/electromechanical/axial-and-radial-flux-permanent-magnet-machines-what-is-the-difference> (дата обращения 16.02.2025).
2. А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.В. Лихачёва, М.И. Никифоров, И.В. Еремин. Разработка методики проектирования торцевых синхронных двигателей из аморфной стали с использованием технологии цифровых двойников // Вестник ИГЭУ, 2021, вып. 4, с. 38–46.

И.В. Дайбов, студ.; рук. С.В. Ширинский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИЛОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Современная авиация стоит на пороге революции, связанной с внедрением гибридных силовых установок (ГСУ). Эти системы призваны сделать воздушные суда более экономичными, экологичными и менее шумными. Одним из ключевых элементов, без которого невозможна работа такой установки, является силовой преобразователь электроэнергии.

Авиационная гибридная силовая установка — это система, которая сочетает традиционную газотурбинную силовую установку в качестве источника энергии и тяговый электродвигатель, а также буферную батарею и полупроводниковый силовой преобразователь.

Внедрение гибридных технологий в авиацию сулит значительные выгоды: снижение расхода топлива; сокращение вредных выбросов; уменьшение шумности, повышение надежности [1].

Силовые преобразователи обеспечивают питание и управление работой электродвигателя. Основные типы используемых преобразователей: инвертор, выпрямитель и преобразователь частоты. Инвертор является самым критичным элементом. Он преобразует постоянный ток от аккумуляторов или выпрямленный ток от генераторов в переменный ток регулируемой частоты и амплитуды для питания бесщеточных электродвигателей, вращающих воздушные винты или вентиляторы. Выпрямитель преобразует переменный ток от генераторов в постоянный для заряда аккумуляторов или питания высоковольтной сети постоянного тока. Преобразователь частоты не является синонимом инвертора. В общем случае он может управлять частотой переменного тока, что позволяет точно регулировать скорость вращения электродвигателей.

Существенным ограничением на пути создания абсолютно экологически чистого самолета с ЭД сегодня является отсутствие мощных, энергоемких и, главное, легких АКБ. Прогресс в области силовой электроники играет решающую роль в развитии авиационных ГСУ. Совершенствование силовых преобразователей на основе широкозонных полупроводников позволит создать еще более легкие, эффективные и надежные системы.

Литература

1. **Бондаренко Д.А., Равикович Ю.А.** Обоснование применимости гибридных силовых установок на летательных аппаратах различного типа и назначения. Вестник Московского авиационного института. 2023 Т. 30 № 2 С. 148–157.

Д.А. Хнычев, асп.; рук. А.А. Кирякин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Разработка многофазных частотно-регулируемых приводов, начавшаяся в конце 1960-х годов, активно развивается благодаря ключевым преимуществам многофазных машин перед традиционными трёхфазными [1]. Эти преимущества включают повышенную надёжность системы, уменьшение пульсаций электромагнитного момента и снижение токовой нагрузки на каждую фазу. Именно поэтому многофазные машины нашли широкое применение в таких ответственных отраслях, как судостроение, авиационная техника и электромобили. Однако для эффективного проектирования систем управления этими приводами необходимы точные параметры их схем замещения, которые зачастую не указываются в полном объёме, что и делает задачу их определения актуальной.

Целью данной работы являлась разработка метода определения параметров схемы замещения многофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Данный метод основан на проведении экспериментов в среде динамического конечно-элементного моделирования [2].

Достоверность предложенного метода подтверждена комплексной верификацией с использованием специализированного программного обеспечения аналитическим методом и математическим моделированием.

Таким образом, разработанный метод позволяет точно определять параметры схем замещения многофазных асинхронных двигателей. Его применение способно повысить точность моделирования и настройки современных частотно-регулируемых электроприводов, что особенно важно для ответственных применений, где требуются высокая надёжность и отказоустойчивость.

Литература

1. **Levi E.** Multiphase electric machines for variable-speed applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2008. — Т. 55. — №. 5. — С. 1893–1909.
2. **Хнычев Д.А., Магин В.В., Панасюк М.Б.** Метод определения параметров схемы замещения многофазной асинхронной машины с применением конечно-элементного моделирования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2025. — Т. 206. — №. 3. — С. 10–20.

М.С. Венцеров, асп.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ

Определение магнитных параметров материалов всегда является актуальной задачей при проектировании разнообразных электротехнических устройств, в том числе электрических машин. Практика показывает, что в ряде случаев даже небольшое изменение параметров от минимально допустимой до максимально допустимой границы (в пределах нормативного диапазона) приводит к заметным различиям с точки зрения функционирования проектируемого устройства (в большей степени это касается постоянных магнитов). В ряде случаев выгодно использовать ферромагнитные конструктивные элементы устройства в качестве части общего магнитопровода (например, станина машины постоянного тока). При этом для конструктивных материалов магнитные свойства, как правило, не нормируются и могут находиться в самых широких пределах. Оперативный контроль магнитных свойств актуален также при производстве самих электротехнических материалов.

В данной работе предлагается относительно простой способ реализации стенда для измерения магнитных свойств, в частности, магнитных потерь сердечников из электротехнических сталей. Определение потерь осуществляется путем анализа осциллограмм входного тока и напряжения обмотки возбуждения, а также ЭДС измерительной обмотки. Фрагмент осциллограмм, полученных в ходе измерения потерь, представлен на рис. 1.

Данный способ может быть полезен специалистам, работающим в области разработки и изготовления электротехнических материалов и устройств.

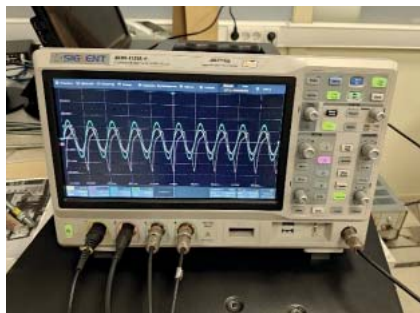


Рис. 1. Осциллограммы входного напряжения (желтый), тока (розовый) и индуцированной ЭДС (синий). Несинусоидальность тока объясняется насыщением исследуемой стали

О.А. Морозов, студент, И.А. Рахманов, аспирант;
рук. А.С. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ МОТОР-КОЛЕС С ВСТРОЕННЫМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

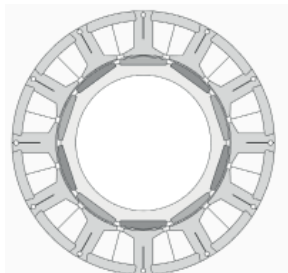


Рис. 1. Модель мотор-колеса в программной среде COMSOL Multiphysics

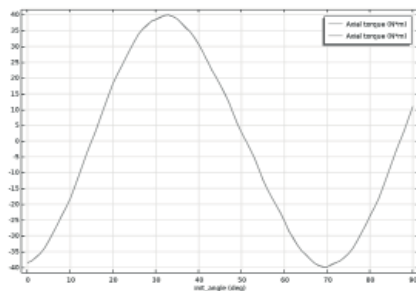


Рис. 2. График момента от угла поворота в номинальном режиме работы

Мотор-колеса набирают популярность среди инновационных решений в области интеграции новых типов электродвигателей для электромобилей. Востребованность таких типов двигателей возникает ввиду возможности регулирования различной мощности и оборотов на каждом колесе отдельно, высокой эффективности, бесшумности, компактной форме и надежности [1].

Бесколлекторные двигатели, а именно синхронные двигатели с постоянными магнитами самый распространенный тип двигателей среди мотор-колес ввиду легкости, высокого КПД, широкого диапазона регулирования скорости и высокого показателя удельной мощности [2].

Модель спроектированного мотор-колеса в программной среде COMSOL Multiphysics приведена на рис. 1. График зависимости крутящего момента от угла поворота ротора в номинальном режиме работы приведен на рис. 2. Основные параметры двигателя приведены в таблице 1.

Путем оптимизации средствами программного комплекса удалось добиться улучшения выходных параметров относительно НИОКР, взятого за основу проектирования.

Таблица 1. Параметры спроектированного мотор-колеса

I_n , А	M_n , Нм	p	N , пазов	$D_{\text{статора}}$, мм	$D_{\text{ротора}}$, мм	$D_{\text{расточки}}$, мм	$L_{\text{двигателя}}$, мм
80	39,8	10	12	82,5	104	85	63

Литература

1. А.Н. Щербо, О.О. Соломин, А.М. Шаталов. Перспективы применения бесколлекторных двигателей в качестве исполнительных электроприводов транспортных средств специального. М.: ОАИИ, Наука и военная безопасность, стр. 12–17, 2021.
2. P. Mattavelli, L. Tubiana, and M. Zigliotto. Torque-ripple reduction in PM synchronous motor drives using repetitive current control, Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 20, стр. 1423–1431, 2005.

Я.В. Ареев, студ., рук. Е.В. Качалина, к.т.н., доц.,
М.Ю. Румянцев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»),
В.А. Калий, д.т.н. (АО «УАПО»)

ГИБРИДНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЁТОВ

В настоящее время для летательных аппаратов (ЛА) создаются новые силовые установки, которые отличаются улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками: снижением расхода топлива на 10%, уменьшением воздействия на окружающую среду, увеличенной полезной нагрузкой. Для реализации этих идей используют гибридные силовые установки (ГСУ) со сложной архитектурой, в структурную схему которых интегрированы ДВС (не менее 150 кВт) и электрические машины. В «полном» ГСУ ДВС имеет высоковольтный участок бортовой сети, включающий мощную АКБ, и может некоторое время двигаться на электротяге или использовать для движения ДВС, который в некоторых режимах может работать в комбинации с электроприводом.

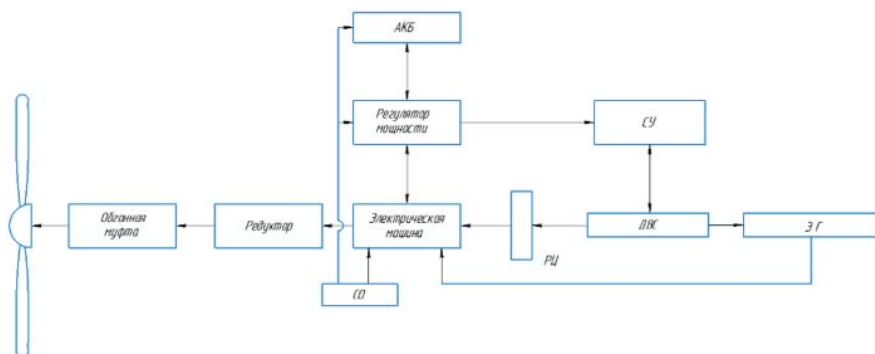


Рис. 1. Структурная схема ГСУ: АКБ — аккумуляторная батарея, ДВС — двигатель внутреннего сгорания, РЦ — расцепное устройство, СО — система охлаждения, СУ — система управления, ЭГ — электрический генератор

В данной ГСУ (рис.1) ключевым элементом является синхронная двухкаскадная электрическая машина ($P = 10$ кВт) [1]. В используемой «параллельной» схеме ГСУ ДВС непосредственно подключается к трансмиссии и используется как в качестве привода генератора, так и непосредственно для создания тяги (в некоторых режимах «параллельно» с электроприводом). Для решения задачи обеспечения энергией всей электрической системы в условиях проблемы пульсаций моментов от ДВС будет произведён электромагнитный, вентиляционный и тепловой расчёт синхронного генератора.

Литература

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1990.

Цзя Ши Хао, студ.; рук. А.Р. Сандыбаева, доц. (КГТУ, Бишкек)

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЕКТАМИ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В данной работе систематически рассматриваются значение, цели и основные компоненты управления электротехникой и специализированного проектирования с целью создания комплексной системы знаний и практического руководства для специалистов в этой области. Управление электротехникой охватывает такие ключевые аспекты, как планирование проекта, организационная координация, контроль графика, управление качеством и управление затратами, которые необходимы для обеспечения бесперебойной реализации проекта, повышения качества проектирования и оптимизации распределения ресурсов. В рамках специализированного проектирования расчет нагрузки требует точной оценки потребности в электроэнергии для балансировки мощности системы; проектирование системы электроснабжения фокусируется на выборе подходящих источников питания и конфигурации подстанций для обеспечения надежности и стабильности; проектирование системы освещения должно сочетать адаптацию к конкретным сценариям с энергоэффективностью и комфортом пользователя; а проектирование молниезащиты и заземления делает акцент на комплексной защите от электрических опасностей. На примере практического примера в статье дополнительно показано, как управление и проектирование взаимодействуют на протяжении всего жизненного цикла проекта для решения сложных задач, подчеркивая важную роль межведомственного взаимодействия и интегрированных стратегий в решении реальных проблем и оптимизации результатов проекта.

Литература

1. **Ahmed S, El-Sayegh S.** Critical review of the integration of Building Information Modeling (BIM) in electrical engineering projects [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103360.
2. **Bologna S, Setola R.** The need for a systemic approach to cybersecurity in power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(1): 220–234.
3. **Bivona E, Montemaggiore GB.** Integrating sustainability into project portfolio management: A case study of an energy company[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 121987.
4. **Cao X, Dai X, Liu J.** Building energy consumption prediction and optimization: A review [J]. Energy and Buildings, 2016, 128: 81–96.
5. **Dibowski H, Ploennigs J.** Automated design of building automation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3629–3638.
6. **Eastman C, Teicholz P, Sacks R, et al.** BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors [M]. 3rd ed. New Jersey: Wiley, 2018.

Д.С. Лобань, студ.; рук. Е.П. Курбатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)»

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ОНЛАЙН МОНИТОРИНГА

Современная энергетика и авиационная промышленность вступают в эпоху цифровой трансформации, ключевым элементом которой является внедрение технологий цифровых двойников. Эти технологии позволяют создавать виртуальные копии физических объектов, что открывает новые возможности для прогнозирования, оптимизации и управления в реальном времени. Особую актуальность это направление приобретает применительно к таким критически важным и сложным агрегатам, как турбогенераторы.

Цифровая модель (Digital Twin) турбогенератора — это не статический чертеж, а динамическая, самообучающаяся программная модель, которая в режиме реального времени получает данные с датчиков, установленных на физическом объекте. Модель непрерывно отражает текущее состояние агрегата, включая механические, тепловые и электромагнитные параметры.

Внедрение цифровых двойников в системы онлайн-мониторинга сулит значительные преимущества: повышение надежности и готовности оборудования; переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию (Predictive Maintenance); снижение эксплуатационных расходов; минимизация рисков внезапных отказов [1].

Архитектура цифрового двойника турбогенератора, как правило, включает несколько ключевых уровней: физический объект (турбогенератор с датчиками), уровень передачи данных (промышленный IoT), виртуальную модель (математические и имитационные модели) и уровень приложений (интерфейсы для анализа и принятия решений). Виртуальная модель является самым критичным элементом, поскольку именно она обеспечивает точность прогнозов.

Существенным ограничением на пути массового внедрения цифровых двойников является необходимость обеспечения высокой точности моделей, качества поступающих данных и их безопасной передачи. Прогресс в области облачных вычислений, больших данных и искусственного интеллекта играет решающую роль в преодолении этих барьеров. Совершенствование алгоритмов машинного обучения позволит создавать самонастраивающиеся модели, повышающие точность прогнозирования остаточного ресурса турбогенератора.

Литература

1. Gartner Report. «Digital Twins: From Concept to Practice». — 2022. — Stamford, Connecticut, USA. — №1. [Электронный ресурс] // URL: https://www.researchgate.net/publication/357953310_Digital_Twin_From_Concept_to_Practice.

*А.В. Кутерман, студент; И.А. Рахманов, ассистент;
рук. О.Н. Молоканов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАСЛЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ: ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

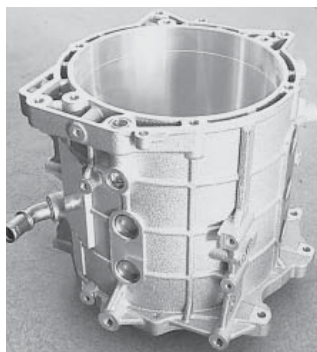


Рис. 1. Рубашка охлаждения электродвигателя

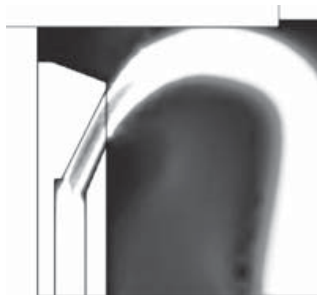


Рис. 2. Моделирование масляного охлаждения торцевой части обмотки статора

Рост необходимой мощности и компактности современных электродвигателей требует перехода к более эффективным системам охлаждения. Прямое масляное охлаждение становится одним из ключевых решений для улучшения теплоотвода, позволяя увеличить мощность, и уменьшить габариты машины [1].

Среди перспективных методов выделяются три основных: охлаждение через внешнюю рубашку статора, орошение торцевых частей обмотки и комбинированная система с подачей масла на ротор. Каждый подход обладает особенностями в организации теплообмена и конструктивной реализации [2]. Пример рубашки статора охлаждения представлен на рис.1.

Теплофизическое моделирование процессов было выполнено с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics 6.2. Расчет позволил провести сравнительный анализ эффективности различных методов охлаждения. Разработанная модель охлаждения торцевой части обмотки статора электродвигателя приведена на рис. 2. Результаты моделирования демонстрируют значительное влияние выбора метода охлаждения на рабочую температуру электродвигателя.

Проведенное исследование позволило оценить эффективность каждого метода охлаждения, и определить требуемые габариты и параметры электрической машины.

Литература

1. Драгомиров М.С., Королев С.В., Ефимов А.В. Анализ эффективности систем охлаждения тяговых асинхронных электродвигателей // Вестник ИГЭУ. — 2020. — № 4. — С. 68–75.
2. Huang C., Xiong L., Hu L. et al. Thermal Design and Analysis of Oil-Spray-Cooled In-Wheel Motor // World Electric Vehicle Journal. — 2023. — Vol. 14, No. 5. — Pp. 105–118. — DOI: 10.3390/wevj14050105.

Ф.А. Крайнов, студент; рук. А.А. Кирякин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ШАРОВОГО ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Маховичная система ориентации космического аппарата (КА) служит для управления угловым движением космического аппарата. Исполнительными органами активных маховичных систем ориентации являются двигатели-маховики (ДМ).

ДМ предназначены для создания управляющих моментов относительно центра масс КА. ДМ имеют несколько вариантов конструкции: плоскопараллельная, кольцевая и шаровая, — из которых лучшими характеристиками обладает исполнение трёхосевого шарового двигателя-маховика (ШДМ). Один ШДМ уменьшает массу маховичной системы, что является важным достоинством при проектировании космической техники.

ШДМ по принципу действия представляет собой асинхронный двигатель, который имеет сферический ротор (маховик), подвешенный на электромагнитном подвесе (ЭМП). Ротор ШДМ вращают шесть дуговых статоров, размещённых попарно в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях. За управление вращающим магнитным полем ШДМ и создание управляющего момента отвечают три канала управления статора. За поддержание ротора в электромагнитном поле отвечают три автономных канала управления ЭМП. Благодаря отсутствию механических опор ШДМ имеет достаточно большой ресурс работы.

Измерение частоты вращения и направление вращения маховика осуществляется тахогенераторами. Приведение во вращение маховика ШДМ осуществляется с помощью создания вращающего магнитного поля, которым можно управлять одновременно в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях.

В настоящей работе приведена математическая модель ШДМ, предназначенная для определения вращающегося электромагнитного поля в каждой из трёх ортогональных плоскостей. Представлены результаты анализа конструкций статорной обмотки. Рассмотрены возможности создания модели ШДМ в программе COMSOL Multiphysics.

Литература

1. **Васильев В.Н.** Системы ориентации космических аппаратов. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. с. 310.
2. **Херинг, Хафнейгель.** Система с инерциальной сферой для управления угловым положением искусственных спутников Земли / Ракетная техника. 1961. № 8. с. 148.

А. Соколов, студ.; рук. В.Б. Баль, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

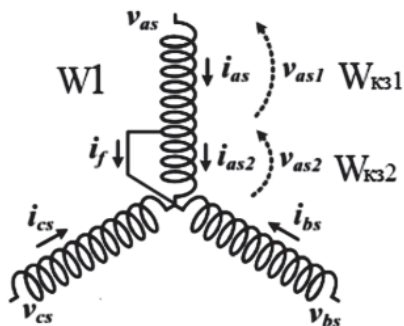


Рис. 1. Трехфазная обмотка статора АД с КЗ в фазе «а»

В мониторинге коротких замыканий в обмотках асинхронных двигателей токовая диагностика становится перспективным направлением для изучения и разработки. Короткие замыкания становятся частой проблемой в короткозамкнутых обмотках электрических машин так что применение такой методики, отличающейся прямым действием, дает конкретные параметры и значения в реальном времени.

В работе рассматривается метод токовой диагностики на основе расчётов коэффициентов несимметрии среднего и действующих значений токов фаз.

В такой методике нет необходимости раскладывать токи на гармонические составляющие и находить коэффициент несимметрии с помощью них. Благодаря этому мониторинг и диагностика обмоток асинхронных двигателей становится проще в использовании. Планируется усовершенствование метода токовой диагностики, улучшение алгоритма расчета. Так же в перспективе разработать более чувствительный и простой в обращении датчик, который будет реагировать на изменение коэффициента несимметрии, а значит будет уведомлять об неисправности.

Исследование приведет к расширению возможностей алгоритма нахождения коэффициента несимметрии и улучшению метода токовой диагностики.

Литература

1. Сафин, Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сафин Наиль Рамазанович. — Екатеринбург, 2017. — 24 с. — EDN YLGAPP.

Д. Ганин, студ.; рук. А.С. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Современное проектирование гидрогенераторов характеризуется большим числом взаимосвязанных параметров: активной мощностью, частотой вращения, диаметром ротора, воздушным зазором, типом охлаждения и др. Применение параметрического подхода позволяет создавать семейства взаимосвязанных моделей, автоматически пересчитывать геометрию, электромагнитные и тепловые характеристики при изменении исходных данных и проводить многовариантную оптимизацию конструкции на ранних стадиях проектирования.

В работе рассмотрены принципы построения параметрических моделей гидрогенераторов, проанализированы существующие методы параметризации в отечественной и зарубежной практике, а также приведены примеры использования параметрического проектирования для оптимизации активных частей, систем охлаждения и механической прочности крупных гидрогенераторов.

Параметрическое проектирование гидрогенераторов обеспечивает существенное сокращение трудоёмкости проектных работ, повышение точности расчётов и возможность быстрой адаптации конструкции под конкретные условия гидроэлектростанции, что особенно важно при модернизации существующих и создании новых гидроагрегатов большой мощности.

Литература

1. **Копылов И.П.** Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. **Пятаков В.П., Мешков В.Н.** Параметрическое проектирование электрических машин. — М.: Изд-во МЭИ, 2018.
3. **Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V.** Design of Rotating Electrical Machines. — Wiley, 2014.

Д.В. Кравцов, студ.; рук. А.С. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МОЩНОСТЬЮ 30 кВт

Проектирование современных синхронных генераторов требует применения точных методов расчета, позволяющих прогнозировать характеристики до изготовления опытного образца. Наиболее полный и надежный результат обеспечивает использование метода конечных элементов (МКЭ), широко освещенного в литературе [1]. Данное исследование демонстрирует практическое применение МКЭ для расчета и моделирования синхронного генератора мощностью 30 кВт.

Моделирование выполнялось в программной среде FEMM 4.2. На первом этапе была создана двумерная геометрическая модель генератора, аналогичная рассмотренным в [1, 2] конструкциям. Для проведения магнитостатического анализа были заданы свойства материалов и граничные условия. Особое внимание было уделено моделированию ключевых режимов работы: холостого хода, короткого замыкания и номинальной нагрузки, в соответствии с методологией, подробно описанной в [2].

В ходе анализа были получены распределения магнитного поля в поперечном сечении машины, рассчитаны индуцированные напряжения в режиме холостого хода и определены синхронные индуктивные сопротивления по осям d и q. Для номинального режима работы был вычислен электромагнитный момент и угол нагрузки. Расчетное значение момента показало высокую сходимость с требуемым значением для мощности 30 кВт.

Проведенное исследование подтверждает эффективность применения пакета FEMM и методов МКЭ для сквозного проектирования синхронных машин. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции с целью улучшения массо-габаритных показателей и энергетической эффективности генератора.

Литература

1. **Hrabovcová V., Rafajdus P., Makýš P.** Analysis of Electrical Machines. London: Springer, 2020.
2. Моделирование синхронных машин с обмотками возбуждения на явно выраженных полюсах // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Электротехника». М.: МЭИ, 2023.

А. Нийомизеро, студ.;
рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доцент (НУИ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ Б 110 КВ

В 1980 году в Бурунди появилась первая национальная гидроэлектростанция Рувиронза мощностью 1 МВт. До этого периода Бурунди импортировала энергию из Конга с Рузизи 1 с 1958 года. В настоящее время электростанции в Бурунди представляют собой солнечные с 7,5 МВт, тепловые с 35 МВт и гидроэлектростанции с 111,1 МВт. Электростанции, строящиеся к 2026 году, будут располагать мощностью 60,15 МВт. Основные проблемы линий электропередач Бурунди связаны с устаревшим оборудованием. Устаревшие электросети наносят ущерб и убытки предприятиям, фабрикам и другим потребителям. Производство становится недостаточным, и некоторые семьи сильно страдают из-за несвоевременного отключения электроэнергии. Для предотвращения и прогнозирования отказов необходимо использовать системы мониторинга. Современные методики диагностики позволяют заранее оценить состояние изоляции, чтобы предотвратить дорогостоящие аварии. Кабели высокого напряжения и их соединительные элементы контролируются на заводе перед установкой и проводятся испытания после установки, чтобы гарантировать их качество и надёжность. Однако механические силы, скрытые дефекты и дефекты, возникшие при монтаже кабельных аксессуаров на месте, могут вызвать частичные разряды в процессе эксплуатации.

Если не принять меры, частичные разряды повредят изоляцию и могут привести к полному пробое и выходу из строя всей кабельной системы в процессе эксплуатации. Такие сбои приводят к незапланированным отключениям электроэнергии. Представлены результаты моделирования частичных разрядов в изоляции.

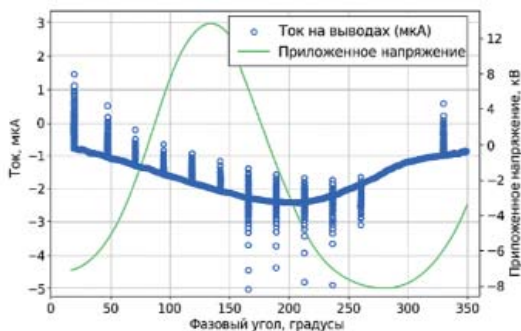


Рис. 1. Ток частичных разрядов в зависимости от фазового угла

Литература

1. Гулам А.Х., Вакар Х., Фархан М., «Методы диагностики частичных разрядов для высоковольтного оборудования в энергосистемах», 2023.

*З.В. Кудряшова, студент;
рук. А.С. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ГОРОДСКОГО МОНОРЕЛЬСА

Несмотря на то, что было принято решение закрыть монорельс в России этот вопрос остается перспективным, учитывая опыт других стран, в особенности для Китая и Японии, так как бурный рост городов и увеличивающаяся плотность населения резко усложняет транспортную проблему. По существу улицы городов загружены и не позволяют существенно увеличить пассажиропоток. Одним из путей решения этой проблемы — внедрение монорельса, располагающегося над уровнем земли, в пространстве освоенном в городской структуре. В равной мере эта ситуация характерна и для крупных городов России. Особенностью применения монорельса для — тяжелые климатические условия, когда применение традиционного электропривода, реализующего тягу в паре “колесо-путь” не гарантирует устойчивости функционирования в зимний период эксплуатации. В связи с этим для климатических условий России предложен асинхронный двигатель линейного типа, реализация тяги, которого не зависит от сцепления колеса с путевым потоком.

В работе рассмотрен 20-ти летний опыт эксплуатации Московского монорельса, представлена конструкция линейного двигателя, рассмотрены основные принципы формирования тяговой передачи, представлен анализ ее работы в составе поезда.

В работе даны предложения, на основе анализа работы, по иным вариантам компоновочной схемы размещения тягового линейного асинхронного двигателя. Более подробно рассмотрена схема расположением двигателя под свесом балки монорельса.

А.А. Атнагулов, А.П. Бабичев, студ.;
рук. Р.А. Сафиуллин, к.ф.-м.н., доц. (НФ УУНиТ, Нефтекамск)

ВИБРОДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Асинхронные электродвигатели (АД) являются электромеханическими преобразователями и основными электроприемниками во многих предприятиях. Источниками вибраций в АД служат электромагнитные колебания различных сил. Актуальная цель вибродиагностики заключается в установлении взаимно-однозначного соответствия между определенными признаками (параметрами сигнала вибрации) и конкретными дефектами АД [1]. Математическая модель включает диагностический параметр

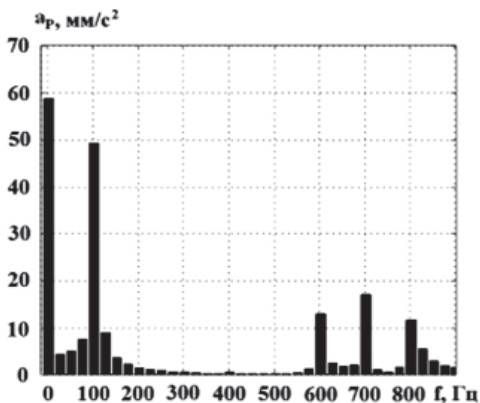


Рис. 1. Виброускорение за время одного поворота ротора

$$D = A_{xx} / A_{наг} ((A_{zp} - A_{наг}) / A_{наг}),$$

где A_{xx} , A_{zp} , $A_{наг}$ — амплитуды вертикальной составляющей вибрации в режиме выбега ротора, при нагрузке или холостом ходу, предельного значения соответственно.

Цель эксперимента — установить закономерности работы АД при нормальном режиме и при возникновении различных видов дефектов.

Эксперимент проводился на стенде на базе серийного АД АИР100S4УЗ мощностью 3 кВт с двумя виброанализаторами BALTECH VP-3470, расположенными сверху и сбоку АД. Анализируемый интервал времени соответствовал одному полному обороту ротора АД.

Математическая модель вибродиагностики АД показала, что $D = 1$ для нормального вращения, а в случае накопления межвитковых замыканий $D = 0,41, \dots, 0,59$. В результате на рисунке 1 возле основной частоты электромагнитных вибраций 100 Гц появляются пики выбега ротора и межвитковых замыканий.

Литература

1. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine. 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020). National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12–14, 2020. pp. 1–5.

Т. Бенсалем, аспирант; рук. В.Б. Баль, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

СНИЖЕНИЕ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Формирование токов в обмотке вентильного синхронного двигателя производится методом токового коридора, когда обмотка, в соответствии с сигналами датчика тока, периодически подключается мостовым инвертором к источнику напряжения и периодически отключается [1]. Во время отключения через обратные диоды инвертора на обмотку подаётся отрицательное напряжение и ток быстро спадает, что приводит к значительному увеличению частоты коммутации, достигающей нескольких кГц и увеличению динамических потерь в силовых ключах мостового инвертора, а также к повышенным добавочным потерям в магнитопроводе двигателя из-за высокочастотных пульсаций магнитного потока.

Замена режима полного отключения обмотки двигателя от источника питания на режим замыкания обмотки двигателя накоротко, может в несколько раз снизить частоту коммутации обмотки. При этом, снижаются добавочные потери в магнитопроводе двигателя и уменьшаются динамические потери в силовых ключах мостового инвертора. При этом, коммутация силовых ключей инвертора с частотой токового коридора будет производиться только половиной ключей. Вторая половина силовых ключей будет коммутироваться с частотой тока фаз двигателя, что в значительной мере уменьшит динамические потери в силовых ключах инвертора.

Исследование процессов коммутации вентильного двигателя приведёт к разработке новых энергосберегающих алгоритмов управления вентильными двигателями, позволит повысить эффективность их применения и повысить их КПД.

Литература

1. **А.Ю. Кузин, И.С. Григорьев, Д.В. Лукичев.** Применение избирательной широтно-импульсной модуляции для управления высокоскоростной синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов. — Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 6/2019.

А.А. Костенко, асп.; рук. Е.П. Курбатова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Одной из основных проблем при эксплуатации электрических машин является сложность оценки их состояния для прогнозирования проведения ремонтных работ [1]. Диагностика также осложняется условиями эксплуатации генераторов: реальные режимы работы турбогенераторов в энергосистеме характеризуются наличием несимметрии определенной степени в подавляющем большинстве случаев. Несимметрия существенно влияет на состояние магнитной системы генератора, в связи с чем возникает необходимость в моделировании несимметричных режимов работы для их последующего анализа и учета особенностей при разработке системы мониторинга.

В рамках настоящей работы выполнена разработка математической модели турбогенератора, позволяющей произвести оценку отклонения контролируемого параметра от теоретического при работе генератора с несимметрией. Этот факт позволяет использовать описываемую модель в качестве цифрового двойника турбогенератора в составе интеллектуальной мониторинговой системы. Развитие аварийного режима определяется по росту расхождения между измеряемыми и расчетными значениями параметров.

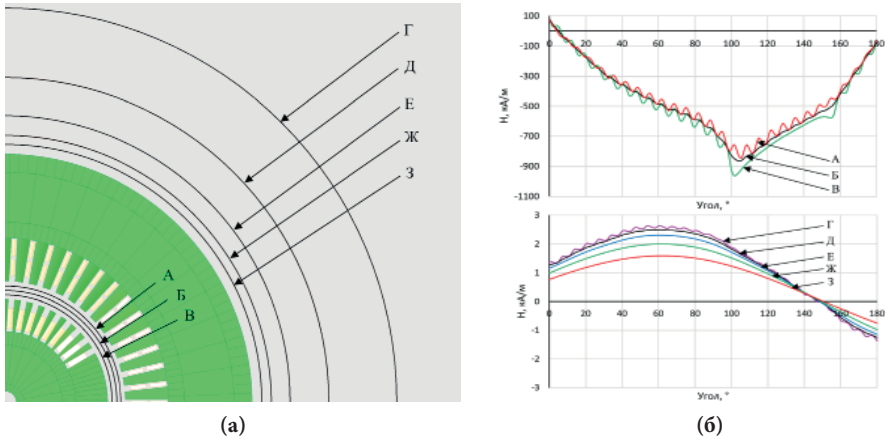


Рис. 1. (а) Модель турбогенератора с линиями расчета поля, (б) распределение напряженности поля

Кроме различных вариантов несимметрии описываемая модель может быть использована для расчета режимов с влиянием различных дефектов на магнитное состояние машины. Это может быть использовано для прогнозирования и классификации развивающихся аварийных режимов по их характерному влиянию.

Литература

1. IEEE Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators (10 MVA and Above).

Е.Д. Смирнов, студ.;
рук. Е.П. Курбатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Повышение энергоэффективности электрических машин (ЭМ) является ключевым направлением импортозамещения и ресурсосбережения. Существующие методы прямого измерения энергетических параметров электроустановок часто неприменимы для действующего оборудования из-за необходимости остановки и конструктивного вмешательства. В связи с этим развитие бесконтактных методов контроля, основанных на анализе токов, напряжений и внешнего магнитного поля (ВМП), представляется актуальной задачей [1].

Проведен анализ научно-технической литературы, также систематизированы современные подходы к бесконтактному контролю состояния и энергоэффективности ЭМ. Выделены основные направления развития методик бесконтактного контроля ЭМ, которые наиболее полно описывают всю картину состояния контролируемого агрегата.

Разработана цифровая модель электрической машины в программном комплексе для расчета электромагнитных полей для последующего расчета его энергетических характеристик при различных режимах работы и состояниях [2]. Также разработана модель для расчета параметров схемы замещения на основе расчетов электромагнитного поля данной ЭМ. Определены параметры схемы замещения.

Проведенный анализ и разработка моделей подтверждают возможность создания комплексной системы бесконтактного контроля, объединяющей анализ токов, напряжений и ВМП. Такой подход позволяет получать наиболее полную картину состояния оборудования и его энергоэффективности без необходимости его останова, что имеет высокую научную и практическую значимость.

Литература

1. **А.Н. Морозов, Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров.** “Идентификация по внешнему магнитному полю внутренних электромагнитных дефектов неявнополюсных синхронных генераторов”, 2022.
2. **Е.П. Курбатова, Е.Д. Смирнов Е.Д., А.А. Костенко.** “Исследование возможности определения несимметрии и эксцентриситета ротора на основе электромагнитных параметров электрогенератора”, Москва 2025.

*Н.С. Федько, студент;
рук. В.А. Кузьмичев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Вентильно-индукторный двигатель — это относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, который сочетает в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы электропривода [1].

Одним из практических применений ВИД является их использование в механизмах собственных нужд электростанций, где традиционно используются асинхронные двигатели [2].

ВИД не имеет обмотки на роторе. Как следствие обладает более высокой надежностью и коэффициентом полезного действия, по сравнению с асинхронными двигателями. Для ВИД характерна высокая ремонтпригодность и низкая стоимость. Таким образом, использование ВИД в качестве привода механизмов собственных тепловых электростанций является перспективным направлением повышения надежности и энергоэффективной выработки электроэнергии.

Исследования структуры механизмов собственных нужд ТЭС, работающих на природном газе, показало, что принципиально ВИД может быть использован для привода питательных электронасосов, дымососов, дутьевых вентиляторов. На настоящем этапе исследований выполнено эскизное проектирование ВИД для привода этих механизмов, работающих в блоках ПГУ — 450 МВт. Результаты проектирования показали, что ВИД имеют меньшую массу и габариты по сравнению с аналогичными по мощности асинхронными двигателями. Данные результаты не являются окончательными. При эскизном проектировании предлагалось, что в двигателе используется симметричная одиночная коммутация фаз. Известно, что более высоких удельных показателей можно достичь при использовании несимметричной парной коммутации. Развитием работы будет исследование характеристик ВИД при использовании такого алгоритма коммутации фаз.

Литература

1. Кузнецов В.А. Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: МЭИ, 2003.
2. Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторный двигатель для привода механизмов собственных нужд электростанций // Автореферат, 2004.

З.А. Климов, асп.; рук. В.А. Кузьмичев, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Метод частотных характеристик (МЧХ/FRA) является одним из наиболее перспективных средств диагностики механического состояния активной части силовых трансформаторов, позволяющий на ранних стадиях выявлять такие критические дефекты, как деформация обмоток, витковые замыкания и смещение магнитопровода. Однако широкое применение метода в эксплуатационной практике осложнено отсутствием унифицированных подходов к интерпретации результатов и зависимостью диагностических заключений от субъективной экспертной оценки. В связи с этим актуальной задачей является разработка доступных и стандартизированных средств автоматизированного анализа данных МЧХ, способных обеспечить объективность диагностики без привлечения специализированного программного обеспечения.

В рамках проведенного исследования был разработан и программно реализован автоматизированный макрос в среде MS Excel. Новизна решения заключается в интеграции алгоритмов обработки данных, основанных на требованиях национального стандарта ГОСТ Р 59239-2020 [1] и отраслевого стандарта КНР DL/T 911-2016 [2]. В отличие от базовых средств визуализации, разработанный инструмент реализует многокритериальный математический анализ, включая автоматический расчет коэффициента стандартного отклонения и корреляционных показателей. По итогам исследования разработаны алгоритм, написанный и отлаженный программный код на языке VBA, был верифицирован работой макроса на массиве реальных данных частотных характеристик, что позволило подтвердить его эффективность в идентификации типовых дефектов активной части.

Перспективы использования полученных результатов позволяют существенно сократить время обработки измерений, минимизировать влияние человеческого фактора и унифицировать критерии оценки состояния оборудования, создавая основу для накопления достоверных баз данных и проведения тренд-анализа в течение всего жизненного цикла трансформаторов.

Литература

1. **ГОСТ Р 59239-2020** Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик. — М.: Стандартинформ, 2021. — 49 с.
2. **DL/T 911-2016** Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers. — The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, 2016.

П.А. Дергачев, к.т.н., доц.; Ле Тху Ча, студент (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Известным ограничением метода MCSA (анализ сигнатуры тока) является падение диагностической чувствительности в режимах малого скольжения, когда боковые гармоники повреждения перекрываются основной частотой сети [3, 4]. В работе проведена верификация алгоритмов машинного обучения (ML) как инструмента преодоления данной проблемы на базе экспериментального датасета Technion [1, 2].

В ходе исследования обрабатывались временные ряды токов статора для состояний от «здоров» до «обрыв 4-х стержней». Сравнивались три архитектуры: SVM (опорные векторы), Random Forest (случайный лес) и CNN (сверточные сети).

Таблица 1. Показатели эффективности диагностических моделей

Алгоритм	Точность, %	Ресурсоемкость	Примечание
SVM	92.5	Низкая	Чувствителен к отбору признаков
Random Forest	95.1	Средняя	Оптимум для встраивания
CNN	99.2	Высокая	Требует GPU-ускорения

Как следует из табл. 1, хотя глубокое обучение (CNN) минимизирует вероятность пропуска дефекта, оно избыточно для простых контроллеров. С инженерной точки зрения, алгоритм Random Forest представляет собой компромиссное решение, обеспечивающее робастность диагностики без существенных требований к «железу» [3].

Литература

1. Experimental Database for Detecting and Diagnosing Rotor Broken Bar Three Phase Induction // IEEE Dataport. URL: <https://ieee-dataport.org> (дата обращения: 20.05.2024).
2. Technion Power Systems. Motor Faults Dataset // GitLab. URL: <https://gitlab.com/power-systems-technion/motor-faults> (дата обращения: 20.05.2024).
3. Effectiveness of Machine Learning in Motor Fault Diagnosis // ScienceDirect. 2023. Vol. 12. P. 101–105.
4. Advanced Signal Processing for Induction Motors // ScienceDirect. 2023. Vol. 45. P. 230–234.

Д.К. Аджиев, асп.;
рук. В.С. Ларин, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»),
конс. А.Н. Панибратец, ведущий научный сотрудник
(ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИФ
им. академ. Е.И. Забабахина», г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЯ СКЛЕЕННЫХ ТРАНСПОНИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

В переменном магнитном поле силового трансформатора внутри массивного медного или алюминиевого проводника наводятся вихревые токи. Эти токи циркулируют поперек сечения проводника, вызывая в нем добавочные потери [1]. Для борьбы с добавочными потерями в мощных силовых трансформаторах используются транспонированные провода (ПТБ). ПТБ состоит из элементарных проводников, переплетенных между собой. Благодаря относительно малым размерам элементарных проводников и их частой транспозиции с шагом около 100 мм добавочные потери сводятся к минимуму [2].

Стойкость при коротких замыканиях (КЗ) — одна из ключевых характеристик, определяющих надежность работы силовых трансформаторов, в том числе с обмотками из ПТБ [2]. При КЗ через обмотки проходят токи, в десятки раз превышающие номинальные. Возникают большие электродинамические силы, которые стремятся сдвинуть, разорвать или смять витки обмотки [1, 2]. Пучок из отдельных гибких проводников под такой нагрузкой может деформироваться, что приведет к повреждению изоляции и выходу трансформатора из строя. Для увеличения механической прочности обмоточных проводов в последнее время широкое применение получили клеенные ПТБ, в которых элементарные проводники покрыты оксидным лаком по специальной технологии.

В рамках исследования эксплуатационных характеристик клеенного ПТБ были проведены эксперименты по оценке его механической прочности. Выполнены испытания нескольких десятков образцов ПТБ методом трёхточечного изгиба, которые позволили получить диаграммы «нагрузка-перемещение» и определить ключевые механические характеристики. В докладе приведены основные результаты этих исследований и выводы по ним.

Литература

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. — 616 с.
2. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. — М.: «Знак». 2005. 520 с.

Секция 23
ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ
И КОМПОНЕНТОВ
Physics and technologies of materials
and components

Председатель секции:

д.т.н., профессор Серебрянников Сергей Владимирович

Секретарь секции: Матасов Антон Владимирович

М.О. Арсентьев, студ.;
рук. Ю.К. Тимошенко, д.ф-м.н., доцент (ВГУ, Воронеж)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ

Код ГРНТИ: 29.05.15.

Исследование посвящено численному решению стационарного уравнения Шрёдингера для электрона в центральном поле. Применены методы конечных разностей, пристрелки.

В процессе исследования применены методы конечных разностей, метод пристрелки. Для проверки корректности расчётов проведено сравнение численных решений с известными аналитическими результатами для простых потенциалов.

Разработано программное обеспечение на языке **Python**, позволяющее рассчитывать спектр энергий и исследовать влияние параметров системы на квантово-механические состояния. Показано, что уменьшение радиуса квантовой ямы приводит к увеличению энергии уровней, что подтверждает проявление квантово-размерного эффекта.

Актуальность работы обусловлена необходимостью моделирования электронных состояний в наноструктурах, используемых в современных оптоэлектронных и фотонных устройствах. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании квантовых точек, квантовых ям и других наноструктур, а также в образовательных целях при изучении основ квантовой механики и вычислительной физики.

Ключевые слова: уравнение Шрёдингера, метод конечных разностей, метод пристрелки, метод Нумерова, квантовые точки, оператор Гамильтона, численные методы, квантово-размерный эффект.

Литература

1. **Ю.К. Тимошенко.** Численное решение стационарного уравнения Шрёдингера: теория возмущений. Учебное пособие. Воронеж: Научная книга, 2019. 14 с.
2. **Давыдов А.С.** Квантовая механика. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 704 с

*Н.Е. Колесников, студ.;
рук. В.Р. Иванова, к.т.н., доцент (КГЭУ, г.Казань)*

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВЫХ СИЛЫ СВЕТА СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ГОМОГЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТА

Одной из главных задач при создании светодиодных источников света является обеспечение равномерного и гомогенного распределения света. Для этого необходимо внимательно проанализировать кривые силы света (КСС) светодиодов, чтобы понять, как распределяется световой поток в пространстве и с какой силой светит в разнообразных направлениях [1].

Распределение светового потока светодиода по пространству относительно углов излучения графически представлено кривой силы света (КСС) [2]. Эта кривая, обладает осью симметрии и ее внешний вид светодиода зависит от его оптических свойств и конструктивных особенностей.

Гомогенность света играет большую роль в задачах освещения рабочих зон, внутренних пространств и декоративных деталей, где индивидуальные светодиоды группируются в модели или панели [3].

Кривая силы света и гомогенность. КСС — график распределения силы света от угла. Для равномерного освещения плоскости необходимо перекрытие диаграмм направленности от соседних источников. Узкий луч создает пятна, слишком широкий — чрезмерное падение освещенности к краям зоны. Оптимум лежит в выборе КСС, чей угол половинной яркости и форма согласованы с геометрией задачи (высотой подвеса, размером и формой освещаемой поверхности) [4]. Моделирование КСС — обязательный этап проектирования современной светодиодной системы. Достижение гомогенности требует не просто выбора светодиода по яркости, а синтеза источника, оптики и пространственной компоновки на основе точных фотометрических данных.

Литература

1. **Иванов А.А., Петров Б.В.** Светодиодные источники света: Теория и практика. — М.: Наука, 2020.
2. **Смирнова Е.В.** Оптическое моделирование светодиодных систем освещения. — СПб.: ЛЭТИ, 2019.
3. **Лукин В.С., Иванова М.Д.** Оптико-электронные методы оценки светораспределения светодиодов // Труды Всероссийской конференции по светотехнике, 2022.
4. **ГОСТ Р 54425-2011.** Светотехнические характеристики светодиодов и светодиодных модулей.3

*А.А. Бойков, аспирант;
рук. Ю.А. Назарова, к.э.н., доц. (РУДН, Москва)*

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ И ВАКУУМНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ПРОИЗВОДСТВА СССР: ПОЛНЫЙ СИСТЕМАТИЗИРОВАННЫЙ КАТАЛОГ

В условиях роста требований к энергоэффективности индикаторных систем проблема доступности вакуумно-флуоресцентных дисплеев (VFD) и газоразрядных ламп остается актуальной [2]. Высокая стоимость современных VFD-модулей побуждает инженеров использовать советские наработки. Настоящая работа представляет первый систематизированный каталог всех известных типов приборов ВЛИ и газоразрядных индикаторов [1, 3]. Личный вклад автора — в верификации и дополнении перечня на основе ранее неопубликованных источников. Полученные результаты открывают перспективы применения в бюджетных проектах.

Таблица 1. Систематизированный каталог газоразрядных ламп и вакуумно-люминесцентных индикаторов производства СССР

Тип индикатора	Наименование
Газоразрядные лампы осветительные и специальные	дрл-125, дрл-250, дрл-400, дрл-700, дрл-1000, дри-400, дри-700, дриз-700, днат-70, днат-100, днат-150, днат-250, днат-400, нлнд-18, нлнд-35, дкст-240, дкст-3000, лб-20, лб-40, лб-80, лд-20, лд-40, лд-65, лхб-20, лхб-40, лтб-40, лтб-80, бсв-15, бсв-30, млт, нл-1, сн-1, сн-2, стн-1, увн, свдш, дрш, дрлф-400, лб4, ivr, lt-3
Газоразрядные индикаторные лампы (НИКСИ-подобные и сегментные)	ин-1, ин-2, ин-3, ин-4, ин-5а, ин-5б, ин-6, ин-7, ин-8, ин-8-2, ин-9, ин-10, ин-11, ин-12, ин-12а, ин-12б, ин-13, ин-14, ин-14а, ин-15, ин-15а, ин-15б, ин-16, ин-17, ин-18, ин-19, ин-19а, ин-19б, ин-20, ин-21, ин-22, ин-23, ин-28, ин-30, игп-17, игпп-32/32, игпс1-111/7, rdmd573204, 1e4ав, п-168
Вакуумно-люминесцентные индикаторы (ВЛИ)	ив-1, ив-3, ив-3а, ив-4, ив-4а, ив-6, ив-8, ив-9, ив-10, ив-11, ив-12, ив-15, ив-16, ив-17, ив-18, ив-19, ив-20, ив-21, ив-22, ив-23, ив-24, ив-25, ив-26, ив-27, ив-28, ив-29, ив-30, ив-31, ив-32, ив-38, ив-39, ивл1-7/5, ивл2-7/5, ивл2-1/5, ивл3-1/5, ивл4-1/5, ивл5-1/5, ивл6-1/5, ивл7-1/5, ивлшу1-11/2, ивлм1-1/7, ивлм1-2/7, ивлт1-1/5, ивлт2-1/5, илц1-1/7, илц1-2/7, илц1-8/7л, илц1-1/9, илц1-2/9, илц1-3/9, илц1-4/9, илц1-5/9, илц1-6/9, илц1-7/9, илц1-8/9, илц1-9/9, илц2-12/8л, илц2-12/8л-р, 20эи1л

Литература

1. Быстров Ю.А. Сто схем с индикаторами. М.: Радио и связь, 1990.
2. Малкин Д.Я. Применение газоразрядных источников света. М.: — Л., 1963.
3. Булычев А.Л. Справочник по электровакуумным приборам. Издательство «Беларусь», 1982.

К.С. Катков, асп.; рук. А.И. Тихонов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИТОЙ ПАРЫ

Витая пара остается ключевым компонентом в структурированных кабельных системах и системах связи. Наиболее универсальным методом моделирования распространения сигнала в таких линиях передачи можно считать численное решение системы телеграфных уравнений [1]. При этом точность модели напрямую зависит от заданных первичных параметров: сопротивления R (Ом/м), индуктивности L (Гн/м), емкости C (Ф/м) и проводимости изоляции G (См/м). При моделировании электромагнитных процессов в кабельной линии, параметры традиционно считаются заданными, однако их расчет для реальной витой пары, с учетом геометрии скрутки и частотной дисперсии, представляет собой отдельную комплексную задачу.

В работе решается задача разработки методов расчета первичных параметров, исходя из ее конструктивных особенностей: диаметра проводников, толщины изоляции, свойств материалов, шага скрутки и наличия других компонентов конструкции кабеля.

Для расчета емкости и проводимости используется численное решение электростатической задачи для поперечного сечения кабеля. Индуктивность рассчитывается с учетом внутреннего и внешнего магнитного потока, что особенно важно на высоких частотах. Сопротивление вычисляется с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости, которые значительно увеличивают активные потери с ростом частоты. Особое внимание уделяется влиянию скрутки жил на распределение электромагнитного поля и, как следствие, на значения первичных параметров.

Разработанный алгоритм интегрирован в существующее веб-приложение для моделирования, созданное на базе фреймворка Solara [2]. Приложение позволяет задавать геометрические параметры и свойства материалов витой пары для анализа распространения импульсов в витой паре.

Данный инструмент планируется использовать в учебном процессе для проведения виртуальных лабораторных работ, а также для дальнейших исследований в области проектирования кабелей связи.

Литература

1. Катков, К.С. Моделирование распространения импульсов в витой паре / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 2025. — С. 446.
2. Solara: [сайт] — URL: <https://solara.dev/> (дата обращения: 20.11.2025)

А.С. Сусликов, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, доц. (НИУ «МЭИ»)

КОНТРОЛЬ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Магнитомягкие материалы находят широкое применение в электрических машинах и аппаратах. Одно из их основных назначений — это проведение максимального магнитного потока с наименьшими потерями. В настоящей работе проведено изучение процесса измерения основных характеристик и потерь на переменном токе кольцевого образца материала стали с маркой 27КХ, в отличие от постоянного тока измеряются динамические характеристики материала из-за чего процесс расчета значительно сложнее, при этом количество полученных характеристик тоже выше [1].

Расчет образца производится в программном обеспечении EasyMAG3D. Измерения параметров материала на практике выполнено с помощью аппаратно-программного комплекса Remagraph C-500. В процессе исследования были получены характеристики материала, рассчитана кривая намагничивания и получены значения удельных магнитных потерь на разных частотах а так же изучены нормативные документы [2]. В ходе моделирования и вычислений была получена кривая намагничивания а так же было проведено сравнение с реальным образцом.

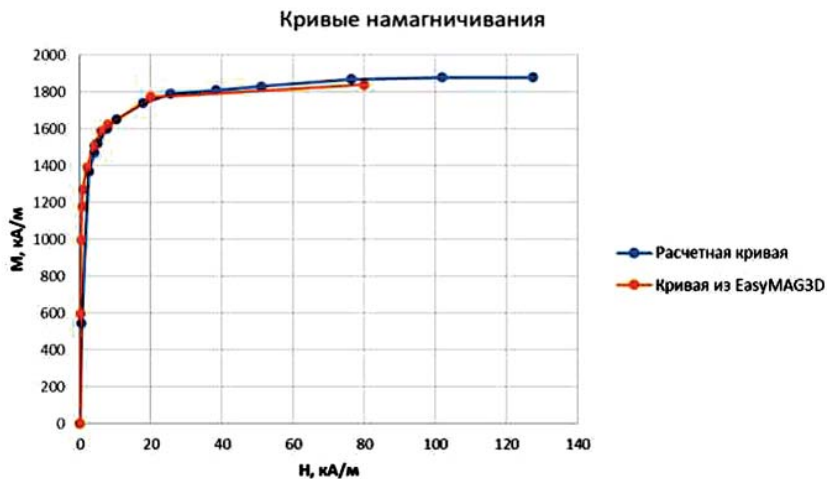


Рис. 1. Сравнение кривых

Литература

1. Мишин Д.Д. Магнитные материалы: Учеб. Пособие для вузов — 2-е издание, перераб. и доп.: Высш. шк., 1991 — 384 с.
2. ГОСТ 12119-80 Сталь электротехническая, методы определения магнитных и электрических свойств.

Е.С. Щербак, студ.;

рук. С.В. Сидорова, к.т.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ОСТРОВКОВЫЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Тонкоплёночные покрытия с нанометровым диапазоном размеров структурных единиц представляют особый интерес в различных областях науки и промышленности, обеспечивая качественную работу приборов и их миниатюризацию, низкое энергопотребление и высокий КПД. Разновидностью наноструктурных тонкоплёночных покрытий являются композиционные покрытия, состоящие из металлических наноразмерных включений, размещённых в диэлектрической матрице.

Композиционные пленки могут быть использованы в качестве аналога чувствительного элемента спин-туннельного магниторезистивного датчика магнитного поля на основе островковых пленок. Датчик состоит из чередующихся слоев ферромагнетиков — никеля и кобальта, разделенных пленками диэлектрика [1]. Одновременное формирование наноразмерных островковых структур и матрицы позволит сократить количество технологических операций при изготовлении чувствительного слоя.

Цель работы — отработка режимов формирования композиционного покрытия металл-диэлектрик на основе никеля и диоксида титана.

Формирование композиционного покрытия осуществляется методом магнетронного распыления с использованием комбинированной мишени на базе вакуумной установки МВТУ11-1МС, [2] расположенной на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Геометрия мишени подобрана исходя из требуемого состава и компонентов пленки. Варьируемыми параметрами при проведении экспериментов были режимы формирования композиционных тонкоплёночных покрытий. Толщина полученных пленок измерена на микроинтерферометре МИИ4, их структура оценена на сканирующем электронном микроскопе.

В дальнейшем планируется оценка объемного соотношения компонентов полученных композиционных покрытий.

Литература

1. **Кириянов С.В.** Внедрение островковой тонкой пленки в СТМР-датчик [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54344125> (дата обращения: 23.11.2025).
2. **Нестеров С.Б.** Десять лучших инновационных продуктов выставки Vacuum Techexpo 2016 [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/7/article_7639_547.pdf?ysclid=m34hkpphp240724435 (дата обращения: 23.11.2025).

К.И. Качурин, студ.;
рук. А.В. Матасов, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ СИНТЕЗЕ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ, КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И СПЕКТРЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА КРИСТАЛЛОВ $\text{NiFe}_2\text{O}_{4+\delta}$

Развитие спинтроники требует новых магнитных материалов с низкими потерями для СВЧ-устройств. NiFe_2O_4 перспективен, но его свойства критически зависят от стехиометрии по кислороду, особенно в объемных монокристаллах [1, 2].

В работе впервые синтезированы монокристаллы $\text{NiFe}_2\text{O}_{4+\delta}$ методом оптической зонной плавки при разном давлении кислорода (15–30 МПа). Установлено, что образец, полученный при 15 МПа с 24-часовым отжигом, демонстрирует оптимальные характеристики: узкую ширину линии ФМР (295 Э) и высокую интенсивность поглощения в диапазоне 5–15 ГГц.

Результаты показывают прямую корреляцию между условиями синтеза и магнитными свойствами. Найденный режим позволяет получать кристаллы с минимальными потерями, что открывает перспективы их применения в спинтронных устройствах СВЧ-диапазона [3].

Литература

1. **S. Takahashi.** Spin Current and Spin Caloritronics // Handbook of Spintronics. — Springer, 2016.
2. **Arras R., Sharma K., Calmles L.** Interplay between oxygen vacancies and cation ordering in the NiFe_2O_4 spinel ferrite // Journal of Materials Chemistry C. 2024.
3. **B. Heinrich, C. Burrowes, E. Montoya, B. Kardasz, E. Girt, Y.-Y. Song, Y. Sun, M. Wu,** Spin pumping at the magnetic insulator (YIG)/normal metal (au) interfaces, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 066604.

*Д.А. Гнеушев, студент;
рук. А.О. Якубов, к.т.н. (НИУ «МИЭТ», Зеленоград)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Фазопеременный материал $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) является наиболее распространенным соединением в технологии энергонезависимой памяти, а также в разработках фотонных интегральных схем, благодаря устойчивым фазовым состояниям, быстрому переключению и сильному контрасту свойств между ними. На характеристики тонких пленок GST225 оказывает существенное влияние метод и методика формирования тонких пленок. Данная работа посвящена отработке технологии нанесения тонких пленок GST225 методами магнетронного распыления на высокочастотном токе (RF) и постоянном токе (DC), а также определению влияния метода нанесения на термические и электрофизические свойства пленок GST225.

Для отработки технологии формирования тонкопленочного GST225 применялось магнетронное распыление с использованием DC и RF. Фиксация толщины полученных пленок проводилась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Температурные зависимости термических и электрофизических свойств получены с помощью дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) Netzsch DSC 204 F1 Phoenix и аппаратно-программного комплекса на основе термостойка Linkam HFS600E-PB4 соответственно.

По результатам АСМ были получены толщины пленок, что позволило определить скорости нанесения для обоих методов. Исследование температурных зависимостей удельного сопротивления позволило установить диапазон температур кристаллизации, а именно: от 150,6 до 169,2 °С для метода DC и от 160,1 до 175,6 °С для метода RF. Результаты исследования термических свойств методом ДСК для пленок, полученных методом DC, хорошо согласуются с результатами температурной зависимости удельного сопротивления.

По итогам работы была отработана технология формирования тонких пленок GST225 разными методами магнетронного распыления. Проведены исследования температурных зависимостей электрофизических и термических свойств, получены температуры фазового перехода тонких пленок, определен контраст удельных сопротивлений между аморфной и кристаллической фазами.

Исследования проводились в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г.,FSMR-2025-0002).

Ю.С. Басарев, студ.;
рук. Ю.М. Носова, ст. преп. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ПЛАНАРНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сегнетоэлектрики находят широкое применение в электротехнических приборах. В СВЧ-аппаратуре сегнетоэлектрики часто используют в качестве тонких плёнок, так как обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогами на ферритах, полевых транзисторах и микроэлектромеханических структурах [1].

Такие сегнетоэлектрики реализуются в виде планарных конденсаторов, где ёмкость зависит от диэлектрической проницаемости не только сегнетоэлектрика, но и подложки [2].

В данной работе исследуются частотные зависимости ситалла, кварца и поликристаллического корунда. Измерения частотной зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь проводились на анализаторе полного импеданса E4991A фирмы Agilent Technologies, позволяющим измерять параметры от 1 МГц до 3 ГГц. Были получены частоты, при которых наблюдается резкое падение диэлектрической проницаемости и рост диэлектрических потерь. Исследование может быть расширено путём выбора других типов подложек и проведения измерений для планарных тонкоплёночных конденсаторов BaSrTiO₃.

Литература

1. **Воротилов К.А., Мухортов В.М., Рассадин А.Э., Сигов А.С.** Через столетие после открытия: сегнетоэлектрики как основа нового поколения отечественных систем обработки и передачи информации // Advanced Science. 2020. № 4(19). С. 42–56. DOI: 10.25730/VSU.0536.20.039.
2. **Сидоркин А.С., Нестеренко Л.П., Железный С.В.** Исследование размерных эффектов в сегнетоэлектрических пленках для создания устройств СВЧ диапазона // Вестник Воронежского института МВД России, 2021, № 3, с. 111–119.

Л.А. Вассуф, асп.; рук. М.А. Боев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО КОМПОЗИТА ГСКВ 0.15

Для изготовления электроизоляционных прокладок нагревательных приборов; пазовой изоляции электрических машин; каркасов для нагревателей и других целей используют различные композиты, среди которых известен слюдинит типа ГСКВ 0.15.

Пути совершенствования современных электроизоляционных, в данном случае, слюдосодержащих материалов, являются, наряду с хорошим электрическим сопротивлением и низкими диэлектрическими потерями, интенсивный отвод тепла в системе, например, статорной обмотки электрических машин, что может обеспечить увеличение допустимой рабочей температуры изоляции и повышение мощности электрической машины.

В данной работе проведены исследования электрических свойств электроизоляционного композита типа ГСКВ 0.15, который выпускают в виде лент. Композит имеет электрическую прочность до перегиба 29,86 кВ/мм, электрическую прочность после перегиба 9,43 кВ/мм и электрическую прочность после выдержки в течение 15 мин. при температуре 500 °С — 21,30 кВ/мм. По результатам проведенного определения удельное поверхностное сопротивление составляет $1,8 \times 10^{15}$ Ом, удельное объёмное сопротивление $4,7 \times 10^{13}$ Ом·м и тангенс угла диэлектрических потерь 9,7%.

Исследование теплофизических свойств показало, что композит типа ГСКВ 0.15 имеет теплопроводность 0,304 Вт/(м·К) .

По результатам представленных исследований можно сделать вывод, что материал — слюдинит высокой нагревостойкости, гибкий типа ГСКВ 0.15 обладает отличными электрическими характеристиками и теплоизоляционными свойствами.

Литература

1. **Боев М.А., Вассуф Л.А.** Электрических свойств композиционного материала ГСКВ 0,15 для электроизоляции в электрических машинах. «Вестник МЭИ» 2026. — № 1. — С. 11–18 (в печати).

*Д.С. Петрищев, студент;
рук. М.А. Боев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛОРОВИНГА В ОПТИЧЕСКОМ ПАТЧ-КОРДЕ В КАЧЕСТВЕ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА

Исследования в данной работе посвящены внедрению стеклоровинга марки ЕС16 600 в конструкцию оптического патч-корда, предназначенного для синхронизации коммутационных панелей, а также для более широкого спектра использования в качестве шнура оптического соединительного (далее ШОС). Целью является замена привычного силового элемента из арамидных волокон для снижения стоимости ШОС.

Изготовлен опытный образец кабеля, который включает в свою конструкцию стеклоровинг указанной марки. В работе приведены исследования, направленные на определение физико-механических и оптических свойств ШОС, а так же сделана оценка соответствия требованиям ГОСТ Р 70437-2022. Разработан новый способ оконцевания ШОС, который включает конструктивные решения, снижающие потерю прочности в узле коннектор — кабель.

Проведено испытание для сравнения вносимых затуханий для ШОС, включающего в себя силовой элемент из стеклоровинга и арамида. Схема испытания приведена на рисунке.

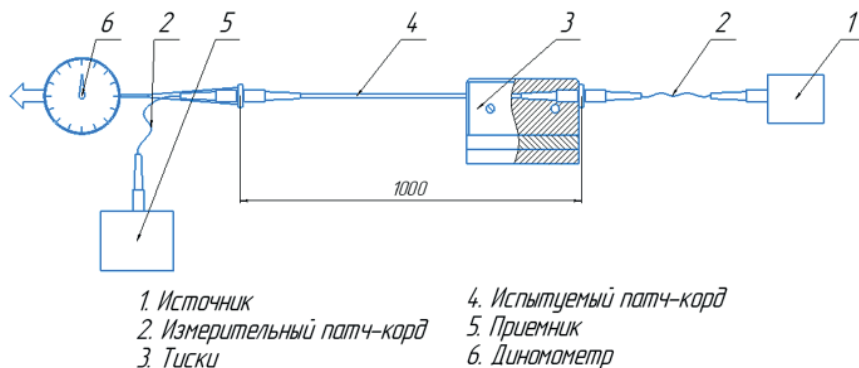


Рис. 1. Схема установки для испытания по выявлению вносимых затуханий ШОС

Изготовлено более сотни образцов, с целью выявления зависимости вносимых затуханий в ШОС от продольного усилия. Из приведенных в работе результатов, очевидна дальнейшая перспектива использования ШОС со стеклоровинговым силовым элементом, ввиду схожих с арамидным материалом физико-механических характеристик при существенно меньшей стоимости.

А.В. Рамазанова, студ.; рук. А.З. Славинский, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА НА ПОЛЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

В последние десятилетия наблюдается возрастающая тенденция к внедрению композитных материалов в различные отрасли промышленности, включая производство полых изоляторов, применяющихся в электротехнике в качестве внешней электрической изоляции. Несмотря на наличие Государственных и Международных стандартов для опорных изоляторов, в России на данный момент отсутствует специализированный стандарт для полых композитных покрышек, что создает пробел в нормативно-технической документации. В рамках разработки Государственного Стандарта будет проведен анализ существующей испытательной базы и стандартов, включая отечественные для других типов изоляторов, с учетом особенностей эксплуатации композитных материалов в условиях высоких электрических и механических нагрузок. Разрабатываемый Государственный стандарт позволит:

- Обеспечить единообразие и высокое качество производства композитных покрышек;
- Повысить безопасность эксплуатации электрооборудования, снизив риски, связанные с неправильным выбором или производством покрышек;
- Согласовать требования к материалам, техническим характеристикам и методам испытаний;
- Основные задачи, которые необходимо решить в рамках разработки стандарта, включают:
- Исследование особенностей работы композитных материалов в условиях эксплуатации на высоковольтных линиях;
- Сравнительный анализ существующих международных стандартов;
- Разработка методик испытаний и критериев оценки качества композитных покрышек.

Таким образом, разработка Государственного стандарта на полые композитные покрышки станет важным шагом в обеспечении безопасности и эффективности эксплуатации оборудования, а также в стимулировании развития отечественного производства и технологий в области электроэнергетики.

Литература

1. **Фокс А., Пратт М.** Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 304 с.
2. **Серебрянников С.В., Славинский А.З., Филиппов А.А.** Влияние различных факторов на повышение электрической прочности внутренней поверхности высоковольтной соединительной муфты (Обзор) // Кабели и провода. — 2021. — № 5 (391). — С. 27–38.

*Н.А. Степанова, студ., О.И. Байдакова, аспирант,
рук. М.А. Боев, проф. (НИУ «МЭ»)*

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВ-В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОМПАУНДОВ

В данной работе предложено усовершенствовать конструкцию пазовой изоляции электромоторов с всыпными обмотками путем применения нового материала «Термомат» (терморасширяющийся препрег на основе стекловолокна), пропитанного электроизоляционным компаундом (К), что позволяет упростить конструкцию и улучшить эксплуатационные характеристики.

В данной работе проведено сравнение компаундов (К) марок КП-303Н (эпоксидно-ангидридный), Элпласт-155ИД (полиуретановая модификация), Элпласт-180ИД (кремнийорганический модифицированный), ПК-11 (эпоксидный с аминоформальдегидным отвердителем). Использовали комплекс методов испытаний: определение вязкости и изменение вязкости во время пропитки; испытание на способность высыхания в толстом слое, измерение цементирующей способности, определение удельного объемного электрического сопротивления, определение электрической прочности, анализ влияния условий и длительности хранения.

Сравнение термостойкости показало, что наилучшую стойкость к высоким температурам показал К марки КП-303Н. Сравнение вязкости показало, что наименьшую вязкость имеет К марки ПК-11. Наибольшую вязкость и стабильность при хранении показал К марки КП-303Н. Так же самый быстрый процесс отверждения у К марки КП-303Н. Электроизоляционные свойства у всех К имеют высокие показатели, но К марки КП-303Н демонстрирует наилучшее сохранение объемного электрического сопротивления при росте температуры. Цементирующую способность так же имеет К марки ПК-11 и КП-303Н.

По результатам комплексного анализа для усовершенствования пазовой изоляции (пропитка материала «Термомат») К марки КП-303Н, который обладает оптимальным сочетанием высокой термостойкости, хорошими диэлектрическими характеристиками, механической прочностью и удовлетворительной скоростью отверждения.

Литература

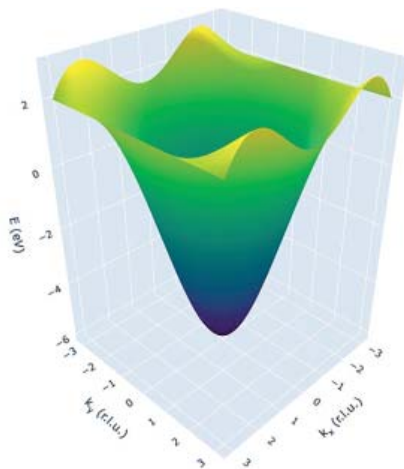
1. **Бобылев О.В.** Технология производства электроизоляционных материалов и изделий / Энергоатомиздат, 1989.
2. **Черняк К.И.** Эпоксидные компаунды и их применение / Химия — 1970.

*Р.В. Щербаков, А.А. Евсюков;
рук. А.В. Матасов, ст.пр. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СЛАБОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ В ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕШЁТКЕ ВИХРЕЙ АБРИКОСОВА

Исследование модели слабой связи для сверхпроводящей частицы в треугольной решётке вихрей Абрикосова относится к актуальным задачам физики сверхпроводников и мезоскопических квантовых систем. Основной задачей в данной работе является получение дисперсионного соотношения для квазичастицы в треугольной решётке вихрей и, на его основе, вычисление эффективной массы и групповой скорости в пределе слабой связи между узлами решётки. Были рассмотрены теоретические предпосылки перехода к модели слабого туннелирования, а также проведён анализ влияния геометрии решётки на форму спектра.

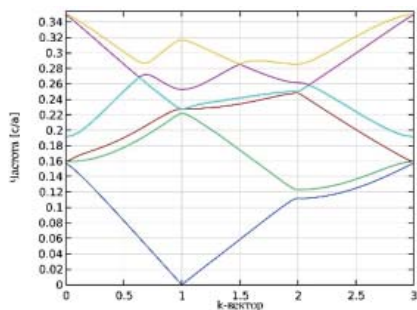
Основываясь на значениях эффективного гамильтониана, была численно получена дисперсия $E(k)$, из которой дополнительно выделены эффективная масса и групповая скорость. Комплексное исследование модели слабой связи в треугольной решётке вихрей позволяет установить связь между структурой вихревой решётки и транспортными свойствами квазичастиц, что может быть использовано при проектировании гибридных сверхпроводящих структур и схем управления квантовыми состояниями в сверхпроводящих кубитах.



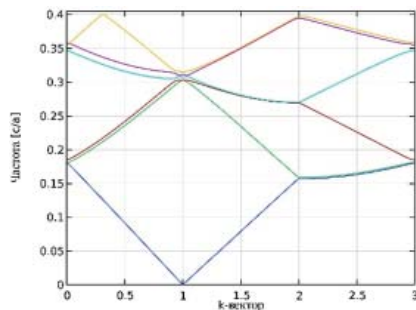
А.В. Иванов, студ.;
рук. А.В. Матасов, ст. преп. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК КВАДРАТНОЙ И ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕШЁТОК 2-Х МЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И ВЫВЕДЕНИЕ ЗАКОН ДИСПЕРСИИ НА ОСНОВЕ ЭТИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В работе представлен подход к моделированию элементарных ячеек квадратной и треугольной формы 2-мерных фотонных кристаллов и выведения на основе этой модели закона дисперсии. Представленные модели позволяют отобразить поведение электромагнитной волны оптического спектра в элементарных ячейках, с нахождением и визуализацией напряжённости электрического поля в зависимости от частоты в 2-мерном пространстве. А также построить закон дисперсии для двух разных решёток, необходимого для дальнейшего анализа и построения Фотонно-кристаллического лазера с поверхностным излучением (PCSEL).



(а)



(б)

Рис. 1. Закон дисперсии, полученный в результате моделирования для:
(а) квадратной решетки; (б) треугольной решетки

*Г.В. Миронов, студ.; Л.А. Эль-Хадж, студ.;
рук. Д.Ю. Терехов, м.н.с. (МИЭТ, Москва)*

ПОРТАТИВНАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Фотолитография — это процесс формирования изображения на подложке за счет экспонирования участков фоторезиста. Существует множество видов фотолитографии, однако наиболее широкое распространение в настоящий момент получили проекционная и контактная фотолитографии, принцип работы которых основан на переносе изображения на фоторезистивную пленку с помощью засвечивания УФ-светом через маскирующие фотошаблоны. Однако необходимость изготовления эмульсионных или металлизированных шаблонов для каждого из создаваемых топологических рисунков приводит к существенному увеличению временных и экономических затрат на производство многослойных элементов и, особенно, их прототипирование. Для решения данной проблемы в настоящей работе была предложена портативная фотолитографическая установка с компьютерно-перестраиваемым фотошаблоном на основе полупрозрачной жидко-кристаллической дисплейной матрицы.

Принцип действия портативной фотолитографической установки основан на реализации управления интенсивностью УФ-излучения, падающего на фоторезист, за счет изменения пропускания различных областей компьютерно-перестраиваемого фотошаблона. Вывод топологического рисунка на фотошаблон осуществляется посредством разработанного ПО, которое позволяет обеспечить передачу изображения, нарисованного практически в любом растровом или векторном графическом редакторе, на программируемый дисплей. Установка является малогабаритной и портативной. Габаритные размеры ПФУ (длину, ширина, высота) составляют 18,4, 13,9 и 11 см соответственно.

Установка обеспечивает возможность работы с образцами размерами до 13 см на 8,4 см (109,2 см²) и обеспечивает достижение предельного разрешения линии изображения 30–50 мкм (ограничивается размером единичного пикселя компьютерно-перестраиваемого фотошаблона).

Время, затраченное от момента сохранения изображения на ПК до получения его на подложке, составляет 1 — 8 мин в зависимости от типа и толщины используемого фоторезиста, в качестве которого может использоваться фоторезисты различного типа (жидкостной/сухой пленочный, позитивный/негативный).

Работа выполнена при поддержке научно-исследовательской лаборатории “Материалы и устройства активной фотоники”.

Д.С. Теляшкин, соиск.;
рук. М.А. Боев, д.т.н., проф. (МЭИ, Москва);
К.А. Харитонов, асп.;
рук. А.П. Леонов, к.т.н., доц. (ТПУ, Томск)

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОДОВ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе изготовления продукции отдельные технологические процессы могут быть соединены в одну процедуру и протекать одновременно. В данной работе предложен технологический процесс обмотки токопроводящей жилы провода изоляцией с одновременной тепловой обработкой изоляции в печи с ИК методом нагрева, так называемой «запечкой». Такой прием назвали комбинированной технологией.

В рамках данной работы поставлена задача определить соответствие параметров готовой изоляции бортовых проводов при изготовлении по комбинированной технологии. Одним из наиболее важных параметров является физико-механическая прочность изоляции. Исследуемый параметр — стойкость изоляции к истиранию по ГОСТ 14340.10-69 «Провода эмалированные круглые. Методы испытания механической прочности изоляции на истирание», согласно которому определяют число двойных ходов иглы до разрушения изоляции. В качестве образца для испытаний выбран провод одного из наиболее популярных сечений токопроводящей жилы, применяемый в бортовой сети, 0,20 мм².

Полученные в ходе испытаний результаты подтвердили идентичность качества изоляции провода изготовленной с применением комбинированной технологии относительно традиционной технологии производства кабельно-проводниковой продукции: обмотка токопроводящей жилы изоляционным плёночным материалом с последующей тепловой обработкой в печах с конвекционным методом нагрева, описанный в статье журнала [1].

Внедрение в производство комбинированной технологии позволяет увеличить производительность изготовления проводов, конструкция которых выполнена из токопроводящей жилы и пленочной изоляции, более чем на 20%, в том числе комбинированная технология позволяет избежать дополнительных потерь производства, возникающих при смене оборудования.

Литература

1. Боев М.А., Китов А.М., Теляшкин Д.С., Харитонов К.А. / Особенности термообработки пленочной изоляции бортовых проводов в печи вертикального типа // Кабели и провода. 2023, № 6(404). с. 28–34.

Секция 24
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ
Electrotechnical and electromechanical
systems and complexes

Председатель секции: к.т.н., с.н.с. Румянцев Михаил Юрьевич

Секретарь секции: к.т.н. Соломин Александр Николаевич

Лвин Тэт Паинг, студент;
рук. Мье Мин Тант, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАЛОИСКАЖАЮЩИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ В СТРУКТУРЕ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Одной из типовых задач на автономных подвижных и стационарных объектах является создание системы электроснабжения (СЭС) с напряжением постоянного тока и (или) переменного тока. С учетом возможного многообразия альтернативных решений и из соображений систематизации и обобщения в [1] предложено различать для таких применений два класса СЭС: машинно-электронные генерирующие системы (МЭГС) со стабилизированным напряжением постоянного тока — МЭГС-1, а со стабилизированным напряжением переменного тока и частотой — МЭГС-2. В обоих случаях общим узлом, преобразующим механическую энергию в электрическую, является вентильный генератор (ВГ) (последовательно включенные электрическая машина и выпрямительный блок). Одним из перспективных решений ВГ на сегодня можно считать использование в нём генератора с магнитоэлектрическим возбуждением. Ключевая проблема, определяющая их применение, заключается в поиске и использовании наиболее эффективного решения, обеспечивающего регулирование (стабилизацию) выходного напряжения ВГ $U_{d0}=const$ при возмущающих воздействиях по частоте вращения его вала и по нагрузке. Одним из решений этой задачи является использование в ВГ в качестве выпрямительного блока четырёхквadrантного преобразователя, иначе малоискажающего выпрямителя — МИВ. В 3-х фазном варианте он обозначается как МИТВ. Для обоснования перспективности такого исполнения ВГ необходимо дать оценку его массогабаритных показателей — МГП. Это возможно лишь при наличии информационно-методического обеспечения для системного его проектирования, которое сегодня в технической литературе отсутствует. МГП МИТВ во многом определяются сопрягающими дросселями переменного тока, которые устанавливаются на его входе. Исследование проведено (при общепринятых допущениях) на основе имитационного компьютерного моделирования в среде OrCAD. Приведены результаты исследований регулировочной и внешней характеристик. Сформулированы предварительные рекомендации, необходимые для системного проектирования МЭГС-1.

Литература

1. **Мыцык Г.С.** О некоторых результатах и проблемах системного подхода к поисковому проектированию машинно-электронных генерирующих комплексов автономных объектов. Труды научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов» / Сборник докладов. — М.: ИД Академии Жуковского, 2016. — С. 283–291.

Р.К. Зарипов, асп., К.А. Ильин, студ.;
рук. А.Е. Сидоров, доцент (КГЭУ, Казань)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВХОДНОГО ТОКА НАГРУЗКИ

Среди показателей качества электрической энергии, согласно ГОСТ 32144-2013 отдельно выделяется несимметрия напряжения в трехфазных электросетях (ЭС). Однако несинусоидальность напряжения из-за асимметрии может возникать и в однофазных сетях при наличии нагрузки с несимметричной вольтамперной характеристикой и вызывать эмиссию высших гармоник (ВГ) в ЭС, что может привести к снижению коэффициента мощности и потере активной мощности [1].

Для предотвращения негативных последствий от эмиссии ВГ в ЭС при несимметрии, необходимо выявить их взаимозависимость и разработать методы снижения. Для проведения экспериментальных исследований и моделирования зависимости уровня эмиссии ВГ от величины несимметрии напряжения в ЭС, разработана установка [2], обеспечивающая физическое моделирование разных уровней несимметрии напряжения ЭС. После оцифровки результатов экспериментов с использованием генератора промышленной частоты, проведена предварительная оценка ее влияния на уровень коэффициента нелинейных искажений (КНИ) напряжения электросети, а соответственно, и на КНИ входного тока нагрузок K_i [3].

Проведённое физическое моделирование несимметрии напряжения однофазной электросети позволило определить взаимозависимость величины эмиссии ВГ от уровня несимметрии, расширить представление о механизме формирования ВГ в ЭС и использовать результаты исследования при разработке эффективных способов их снижения.

Литература

1. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Определение коэффициента мощности искажения нагрузок по номограмме на основе измерения КНИ по току // Практическая силовая электроника, № 4(88) 2022 г., с. 53–55.
2. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Генератор промышленной частоты. Патент на полезную модель № 230090 от 14.11.2024 г.
3. Тукшаитов Р.Х. Зарипов Р.К. Метрологическое обеспечение измерения малых значений коэффициента нелинейных искажений электрооборудования на основе физического его моделирования // Практическая силовая электроника. 2024. № 4 (96). С. 42–45.

С.Д. Крахмалёв, студ.; рук. Г.С. Мыцык, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО С УЛУЧШЕННОЙ ЭНЕРГО-ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

В качестве тяговых электроприводов подвижного состава, например, в московском метрополитене используются пока ещё коллекторные двигатели постоянного тока с напряжением питания 600В. Переход на электропривод переменного тока пока только намечается. При электропитании от промышленной трёхфазной сети с высоковольтным напряжением (6,3 кВ или 10 кВ) требуемое напряжение постоянного тока сегодня обеспечивается трансформаторно-выпрямительными устройствами (ТВУ) преимущественно двухканального типа с пульсностью выпрямленного напряжения $m_{13}=6M=12$, которые обозначаются как ТВУ-6М (а при числе каналов $M=2$, — как ТВУ-12). Вначале, в силу исторически сложившихся причин и обстоятельств, применялось простейшее решение — ТВУ-6 (т.е. в одноканальном его исполнении) с последующим переходом затем на более энергоэффективное его выполнение в варианте ТВУ-12. С течением времени выяснились ещё не используемые резервы и в этом решении, и возможность такой модернизации актуализировалась. Суть этого резерва заключается в недоиспользовании установленной мощности 3-х фазного трансформатора напряжения (ТТН) — с одной стороны, и в завышенной мощности выпрямительного блока (ВБ) — с другой стороны. Оба эти недостатка обусловлены не просчётами в проектировании, а естественным режимом работы данной схемы. Они могут быть исключены использованием в цепи постоянного тока трансфилтра — ТФ-2 [1] (ранее обозначавшегося как уравнильный реактор). Целью работы является дополнительное количественное доказательство преимуществ такого решения (ТВУ-12+ТФ-2 мощностью 0,6 МВт), а также расчёт массогабаритных показателей ТФ-2. Показано, что габаритная мощность ТФ-2, приведённая к частоте 50 Гц, составляет менее 0,4% от выходной мощности ТВУ-12+ТФ-2. Для решения этой задачи используются аналитический способ и имитационное компьютерное моделирование (в среде *OrCad Capture*). При разработке новых проектов ТВУ-1+ТФ-2 габаритная мощность ТТН, как показано в [1] (и подтверждено в работе), может быть уменьшена на 22%, а потери в ВБ могут быть снижены в 2 раза. При использовании же ТФ-2 в уже эксплуатируемых ТВУ-12 заметно повышается их энергоэффективность.

Литература

1. **Мыцык Г.С.** О показателях качества и особенностях построения современных трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом. Промышленная энергетика, 2021, № 3. — С. 2–12.

Хтет Вэй Аунг, студ., Г.С. Мыцык, проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА АВТОТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ АВИАЦИОННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Одним из основных требований, предъявляемых к авиационному электрооборудованию, является минимизация его массогабаритных показателей (МГП) при не превышении заданного перегрева. В тех случаях, когда не требуется гальваническая развязка выходного напряжения от входного, предпочтение отдаётся трансформаторно-выпрямительным устройствам, выполненным на основе не трансформаторов — ТВУ, а автотрансформаторов — АТВУ. В зависимости от технического задания и топологии решения АТВУ, выигрыш в МГП может достигать от $2,5 \div 3$ до 5 раз [1]. В данной работе представлены результаты исследований двух вариантов АТВУ с пульсностью выпрямленного напряжения 18 (АТВУ-18) мощностью $P_{d0}=10\text{кВт}$ при двух значениях выходного напряжения $U_{d0}=27\text{В}$ и $U_{d0}=270\text{В}$ при электропитании от трёхфазной сети 115/200В с частотой 400 Гц. Заметим, что функционал (вход-выход) в обоих классах устройств ТВУ и АТВУ одинаков при любой (одинаковой) канальности — M преобразования электроэнергии. Это означает, что искажения потребляемого из сети тока, одинаковы (при равных условиях) и определяются простой моделью его коэффициента гармоник [2]: $K_{r(i1)} = 0,31/M$; а взаимосвязь между параметром выпрямленного напряжения — U_{d0} и его максимальным значением — U_{dm} определяется известной моделью:

$$U_{d0} = 6M/\pi \sin(\pi/6M)U_{dm}.$$

В работе представлена методика определения габаритной мощности автотрансформатора АТВУ-18 (при $M=3$). Исследование рабочих процессов выполнено в среде *Orcad*. Результаты представлены в виде осциллограмм, таблиц и графиков. Даны рекомендации по проектированию. Достоверность результатов обеспечена использованием критериев самоконтроля.

Литература

1. Хлаинг Мин У. Создание информационно-методического обеспечения для системного проектирования электронных, трансформаторно-электронных и генерирующих машинно-электронных систем электротехнических комплексов автономных объектов. Автореферат дис.-и на соиск. уч. ст. д.т.н. — М.: НИУ«МЭИ», 2016. — 40 с.
2. Мыцык Г.С. О показателях качества и особенностях построения современных трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом. Промышленная энергетика, 2021, № 3. — С. 2–12.

М.М. Абасова, асп.;
рук. М.Ю. Румянцев, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГРАЖДАНСКИХ ЛЕГКИХ САМОЛЕТОВ

В условиях ужесточения экологических норм и роста стоимости авиационного топлива авиационная отрасль остро нуждается в переходе на альтернативные источники энергии. Разработка гибридной силовой установки для легкой авиации является ключевым шагом в декарбонизации местных воздушных перевозок и учебных полетов [1].

В работе проведен комплексный анализ и оптимизация гибридной силовой установки самолетов: сравнительный анализ архитектур, анализ энергобаланса, оценка эффективности и весовой анализ [2].

Основные результаты исследования:

- установлено, что параллельная схема гибридизации является предпочтительней, так как она позволяет гибко использовать оба источника мощности;
- анализ показал возможность снижения удельного расхода топлива на 25–35% за счет работы ДВС в оптимальном номинальном режиме;
- выявлен значительный потенциал рекуперации, способный компенсировать до 10–15% энергии, затрачиваемой на полет;
- определены критические технологические барьеры, главным из которых остается низкая удельная энергоемкость современных авиационных аккумуляторов [3].

Проведенное исследование доказывает принципиальную целесообразность и высокий потенциал гибридной силовой установки для легких самолетов. Несмотря на существующие вызовы, связанные с массогабаритными показателями, технология открывает путь к созданию экономических, экологических и более безопасных воздушных судов ближайшего будущего.

Литература

1. **Sarlioglu B., Morris C.T.** More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft; — in IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015.
2. **Viswanathan V.** Challenges in the Design of Advanced Li-ion Batteries for Aviation; — Nature Energy, 2020.
3. **R.J.R.G., D.N.M.J.** Evolution of Hybrid-Electric Propulsion System for Regional Aircraft; — AIAA Journal, 2016.

Н.Е. Лунгу, студ.; к.т.н., А.Н. Соломин, доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

Данная работа посвящена разработке и исследованию вентильного индукторного двигателя с обмоткой возбуждения. Этот тип двигателя рассматривается в качестве перспективного промышленного электропривода благодаря своим достоинствам. К ним относятся высокая надежность, простая конструкция, высокая перегрузочная способность и хорошие энергетические показатели.

Важнейшим этапом проектирования подобных электромеханических систем является электромагнитный расчет. Его сложность для индукторных машин данного типа обусловлена спецификой магнитной цепи. В контуре замыкания магнитного потока присутствуют участки как с радиальным, так и с аксиальным направлением потока. Эта особенность не позволяет применять методы, основанные на допущении о плоскопараллельности картины поля.

Для проведения исследований использовалась расчетная программа, реализующая метод эквивалентных схем замещения магнитной и электрической цепи [1]. По сравнению с программами, основанными на методе конечных элементов, данный инструмент обладает важным преимуществом. Он позволяет за приемлемое время проводить исследовательские и оптимизационные расчеты, хотя и уступает в точности учета локальных насыщений магнитной цепи.

В ходе исследований был проведен анализ вариантов различной степени детализации в схеме замещения зубцов ротора. Эти зубцы являются одним из самых крупных элементов схемы при использовании применяемого подхода. Для выбранного варианта было изучено влияние и проведена оптимизация геометрических размеров зубцов ротора.

На заключительном этапе исследований был выбран оптимальный алгоритм управления вентильным двигателем. Этот алгоритм обеспечивает во всем диапазоне частот вращения выполнение требований к тяговой характеристике. Одновременно достигается максимальный КПД в условиях имеющегося источника питания.

Литература

1. **Русаков А.М., Окунеева Н.А., Соломин А.Н., Шатова И.В.** Математическая модель электромагнитных процессов в вентильных двигателях. // Вестник МЭИ, 2007. — № 3. с. 33–39.

Ф.Д. Успенский, студ.;
рук. С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В настоящее время огромное количество разнообразных технологических и производственных агрегатов и машин используются в химической, текстильной и в смежных с ними отраслях техники и промышленности [1]. Для привода их рабочих органов оптимальным является многодвигательный индивидуальный электропривод. В его структуре один преобразователь электроэнергии и одна система управления обеспечивают работу группы электродвигателей, каждый из которых вращает один рабочий орган. Рабочие органы, как правило, имеют большие моменты инерции, работать должны синхронно с высокой стабильностью вращения при переменных моментах нагрузки на валу. Оптимальным при таких условиях является управляемый гистерезисный электропривод в режиме электрического синхронного вала [2].

Гистерезисный электропривод позволяет сохранять постоянную частоту вращения вала при изменении момента сопротивления нагрузки на валу в условиях высоких моментов инерции нагрузки — это важное преимущество данного типа электропривода перед другими.

Новизна и перспективы использования результатов подтверждаются направлениями исследований ведущих профильных организаций, в том числе НИИПМ, «ВНИИСВ», ОАО «Каменскволокно» и др.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- обзор и анализ литературных источников по тематике исследования, проектно-конструкторских решений в области систем электроснабжения и электропривода механизмов и агрегатов рассматриваемого назначения;
- расчёт и исследование прецизионного управляемого гистерезисного электропривода технологического механизма для применения в режиме взаимосвязанного электрического синхронного вала в составе технологической машины нового поколения по скоростному формированию химических волокон и выпуску из них углеродных химических нитей.

Синхронный электропривод на основе гистерезисного электродвигателя позволяет увеличить качество выходного продукта машин химической, текстильной и смежных с ними отраслей техники и промышленности, где необходимо синхронное вращение механизмов.

Литература

1. **Коротеева Л.И., Коротеева Е.Ю.** Технология и оборудование для получения волокон и нитей специального назначения. М.: ИНФРА-М. 2015. 288 с.
2. **Орлов И.Н., Никаноров В.Б., Селезнёв А.П., Шмелёва Г.А.** Проектирование гистерезисных двигателей на ЭВМ. М.: МЭИ. 1991. 128 с.

И.Е. Харитонов, студ.; рук. Г.С. Мыцык, д.т.н., проф. НИУ «МЭИ»

ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ВХОДОМ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ВЫХОДОМ

В ряде случаев возникает задача преобразования трёхфазного высоковольтного напряжения — ТФВВН (от десятков до сотен кВ) в столь же высоковольтное напряжение постоянного тока — ВВНПТ. Решается она на основе использования технологий трансформации этого напряжения и последующего его выпрямления с таким же примерно высоковольтным уровнем. Примером применения такого решения может быть альтернативный способ передачи электроэнергии на значительные расстояния с использованием напряжения не переменного, а постоянного тока. Кроме того, имеются и другие области использования ВВНПТ, например, для электропитания радарных и лазерных установок повышенной мощности. При создании такого класса систем возникает проблема определения рациональных технологий практической реализации операций трансформации ТФВВН и последующего его выпрямления. Эти виды преобразования электроэнергии в области повышенных мощностей осуществляются с помощью трансформаторно-выпрямительных устройств многоканального типа — ТВУ-6М, где М — число каналов [1]. Принципиальной их полезной особенностью является повышенное значение входного коэффициента мощности и низкий уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Эти показатели улучшаются с ростом числа каналов М что, в итоге, и определяет их конкурентоспособность. В работе рассматривается новая структурно-параметрическая топология ТВУ-6М. На первом этапе исследований изучался простейший, двухканальный вариант (при $M=2$). Поскольку применение способа аналитического описания рабочих процессов (знание которых необходимо для его проектирования) здесь оказалось невозможным, пришлось использовать компьютерное моделирование. Полученные результаты подтвердили ожидаемые (в соответствии с проектным замыслом) функциональные свойства нового решения, вместе с этим позволили проиллюстрировать сложность описания рабочих процессов и получить ответы, необходимые для его проектирования. В работе представлены варианты схем ТВУ-6М, осциллограммы рабочих процессов, характеристики и параметрические взаимосвязи, необходимые для проектирования.

Литература

1. **Мыцык Г.С.** Показатели качества и особенности построения современных трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом. Промышленная энергетика, 2021, № 3. — 2–12.

Б.Н. Бойматов, асп.; рук. Г.С. Мыцык, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

О МИНИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ LC-ФИЛЬТРА ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Выходные фильтры (ВФ) являются неотъемлемой частью инверторов напряжения (ИН). Наиболее широкое применение здесь получила простейшая топология Г-образного LC фильтра. Практика показывает, что в большинстве случаев применения ВФ установленная их мощность оказывается неоправданно (в той или иной степени) завышенной. В тех случаях, когда ставится задача создания электрического преобразователя с улучшенной удельной массой, актуализируется задача обоснованного определения параметров ВФ, которое исключает возможность неоправданного переразмеривания его установленной мощности. Аналитически однозначно решить такую задачу, далеко не так просто по следующим причинам. Во-первых, искажения выходного напряжения ИН определяются значением тактовой частоты ШИМ — f_t и его спектральным составом (который практически в каждом случае применения свой), а также значением $\cos\varphi_{2(1)}$ нагрузки и её характером (где $\varphi_{2(1)}$ — угол нагрузки по основной гармонике). Во-вторых, от значения тактовой частоты зависит и собственная частота LC ВФ. При этом требуемое значение произведения LC ВФ, которое характеризует его установленную мощность (и его массу), определяется, по сути, заданным значением коэффициента гармоник выходного напряжения ИН — $K_{\Gamma(U2)}$. В-третьих, характеристики ИН во многом определяются также ещё и значением волнового сопротивления ВФ ρ . Им определяется два показателя ИН — жёсткость его внешней характеристики и потери в его ключевых элементах. С учётом этого наиболее рациональное значение параметра ρ также определялось. Решение такой многофакторной задачи выполнено численными способами на основе использования имитационного компьютерного моделирования (ИКМ). В работе приводится предлагаемый алгоритм решения поставленной задачи. Все данные, собранные в ходе ИКМ, структурированы в таблицах и визуализированы графиками зависимостей, необходимых для системного проектирования. Показано, что основное влияние на показатель качества выходного напряжения ИН $K_{\Gamma(U2)}$ имеет значение собственной частоты ВФ — f_0 . Наиболее рациональное её значение определено целенаправленным (минимальным) числом экспериментов. Их цель — определение параметров ВФ, обеспечивающих значение показателя $K_{\Gamma(U2)} \approx 5\%$ при минимальном значении показателя LC при различных значениях тактовой частоты. В результате решения поставленной задачи произведение LC ВФ уменьшено (относительно не минимизированного его значения в экспериментальном образце) в 5 с лишним раз. Приведён также алгоритм определения массы ВФ.

М.Е. Нифонтов, асп.; рук. А.В. Сизякин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОГО АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Повышение энергоэффективности потребителей бортовой сети переменного тока является актуальной задачей для систем электроснабжения летательных аппаратов. Внедрение активных корректоров коэффициента мощности (ККМ) позволяет значительно снизить потери в кабельной сети, уменьшить гармонические искажения в напряжении и токе, а также оптимизировать использование генераторной мощности. В отличие от пассивных ККМ, активные корректоры обеспечивают более высокое значение коэффициента мощности при широком диапазоне изменения нагрузки и входного напряжения.

В данной работе исследуется разновидность активного ККМ с трехуровневой топологией (рис. 1), позволяющей сократить массу требуемого индуктивного фильтра. Несмотря на увеличенное количество силовых полупроводниковых ключей относительно традиционной двухуровневой архитектуры, каждый отдельный компонент схемы испытывает пониженную нагрузку, что позволяет применять полупроводниковые элементы более низкого класса напряжения.

Модель преобразователя построена в отечественной среде динамического моделирования «SimInTech».

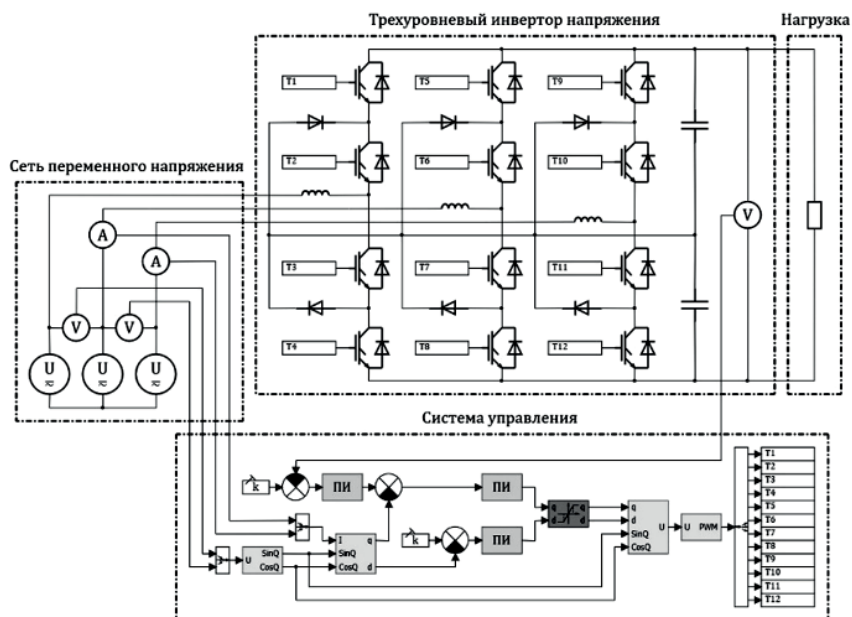


Рис. 1. Схема трехуровневого активного ККМ

Л.С. Шевяков, студ.; рук. Г.С. Мыцык, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТРЁХФАЗНОГО СЕТЕВОГО НАПЯЖЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ПОСТОЯННОЕ НАПЯЖЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Средства обнаружения (СО) движущихся в атмосфере объектов для своего функционирования требуют высоковольтное стабилизированное напряжение постоянного тока с уровнем до десятков кВ. При этом в качестве источника энергии используется трёхфазное напряжение 220/380В частоты 50 Гц (или 400 Гц). Потребляемая СО мощность может доходить до десятков кВт (и более). К преобразователям напряжения (ПН), обеспечивающим согласование исходного и требуемого родов напряжений и их уровней, предъявляются при этом особые требования по электромагнитной совместимости. Традиционные способы решения поставленной задачи создания таких ПН, основанные на использовании традиционных импульсно-модуляционных способов преобразования электроэнергии, в данном случае мало подходят из-за большой скорости изменения коммутируемых в ПН токов и, вследствие этого, создающих повышенное помехоизлучение, подавление которого требует применения соответствующих средств. Целью данной работы (имеющей поисковой характер) является определение (на основе исследования) возможности (и целесообразности) нового способа решения поставленной задачи синтеза ПН на основе использования известного свойства инверторов резонансного типа (ИРТ), которые обеспечивают мягкую коммутацию токов при «нулевом» их значении. Кроме того, отличительной особенностью предлагаемого способа является также: 1) использование простейшей (и, как оказалось, мало исследованной) схемы ИРТ; 2) использование принципа многоканального преобразования энергетического потока, который позволил решить одновременно две задачи: применить транзисторы с недостаточной единичной мощностью (при повышенной мощности ПН и одновременно повысить технологичность изготовления его трансформаторов. В качестве средств решения поставленной задачи использовались методы технического творчества и имитационное компьютерное моделирование (ИКМ). Поэтому после процедуры определения требуемой структурно-алгоритмической организации (САОр) ПН (на основе ИРТ) был проведён предварительный объём работ по расчёту его элементов и узлов. Далее на этапе ИКМ ПН были выявлены, не освещённые в литературе такие вопросы, как: а) проблема запуска ПН; б) не традиционный режим работы конденсатора LC контура; в) недостаток 1-ой версии САОр ПН, который в работе был устранён двухтактным исполнением ИРТ. Функция стабилизации напряжения U_{d0} осуществляется отдельным регулируемым трансформаторно-выпрямительным устройством (РТВУ). Получен объём информации, необходимый на первом этапе системного проектирования ПН.

*Д. Ходжич, студ.;
рук-ли Г.С. Мыцык, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»),
А.В. Бериллов, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)*

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Активное развитие и рост количества используемых единиц аккумуляторного электротранспорта на производствах и на дорогах общего пользования повышают потребность в высокой мощности, компактности и универсальности зарядных станций. Актуальной задачей является разработка эффективных преобразователей, обеспечивающих широкий диапазон выходных напряжений и возможность реализации протоколов быстрой зарядки аккумуляторных батарей.

Целью работы является разработка преобразователя постоянного напряжения 600 В в выходное напряжение от 200 до 1000 В, мощностью 30 кВт. В связи с текущей геополитической ситуацией в мире, в рамках работы рассматриваются варианты реализации преобразователя на отечественной электронной компонентной базе.

В работе выбрана схема последовательного резонансного LLC преобразователя [1]. Это решение обусловлено рядом преимуществ, в частности: высоким КПД в широком диапазоне нагрузок, возможностью реализации «мягких» коммутаций на ключевых элементах (ZVS, ZCS), при частотно-импульсном управлении. Для обеспечения требуемого диапазона напряжений архитектура преобразователя основана на четырех ячейках мощностью по 7,5 кВт с системой переключения между попарно-последовательным и параллельным соединением каскадов [2]. В работе выполнены расчеты резонансного контура, полупроводниковых элементов и трансформатора. На основании расчетов подобраны электронные компоненты. Разработана печатная плата ячейки с учетом тепловой нагрузки, электромагнитной совместимости по стандарту IEC-2221.

Полученные результаты создают основу для дальнейшей разработки и практической реализации подобных устройств.

Литература

1. **Sam A.R.** Resonant LLC Converter: Operation and Design. Application Note AN2012-09. — 2012. — Infineon Technologies North America (ITNA).
2. **Коптяков А.С., Джассим Х.М.** Проектирование и построение резонансного преобразователя LLC // Вестник ПНИПУ. — 2024. — № 51.

М.Г. Коновалов, студ.; рук. С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИРОСКОПА ДЛЯ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Гироскопы с механическим носителем кинетического момента и электрическим приводом — электромеханические гироскопы: с поплавковым подвесом ротора, динамически настраиваемые гироскопы и другие — широко применяются в приборах и системах ориентации, стабилизации, навигации и управления движением автономных объектов. Основной тип электропривода таких гироскопов гистерезисный [1–3]. В настоящее время также разрабатываются и используются гироскопы на основе иной физической природы: микромеханические, волоконно-оптические и другие. Вместе с тем долгосрочные научно-технические прогнозы показывают, что электромеханические гироскопы, так же как и гироскопы, основанные на иных физических принципах, будут продолжать успешно применяться в указанных приборах и системах в длительной перспективе [3].

Для проектирования гистерезисного электропривода были заданы габаритные размеры для его размещения в составе навигационной системы, параметры электропитания и нагрузки, рассматривались возможности и варианты применения новых хромокобальтовых сплавов для ротора.

Новизна проведённых исследований подтверждается направлениями работ ведущих профильных организаций, в том числе АО «НПЦ АП им. академика Н.А. Пилюгина», Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» — «НИИПМ им. академика В.И. Кузнецова». Личный вклад автора следующий:

- обзор и анализ литературных источников по гистерезисному электроприводу, по методам и средствам математического моделирования и проектирования этого типа электропривода и его элементов;
- проектный и поверочный электромагнитные расчёты гистерезисного электродвигателя для привода гироскопа навигационной системы;
- выбор структуры и элементной базы электронного преобразователя, моделирование и расчёт преобразователя и его элементов.

Перспективы использования результатов обусловлены направлениями исследований и практических разработок профильных организаций.

Литература

1. **Орлов И.Н., Никаноров В.Б., Селезнёв А.П., Шмельёва Г.А.** Проектирование гистерезисных двигателей на ЭВМ. М.: МЭИ. 1991. 128 с.
2. **С.Ю. Останин, П.С. Рудник.** Совершенствование программных средств автоматического проектирования гистерезисных электроприводов // Труды ПАО «НПЦ АП» имени академика Н.А. Пилюгина. 2016. № 1 (35). С. 46–53.
3. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. Том 28. № 2 (109). 2020.

А.М. Померанцев, студ.;
рук. М.Ю. Румянцев, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБМОТКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Высокоскоростные (до 150 000 об/мин) синхронные турбогенераторы (ВСТГ) находят применение в микротурбинных энергоустановках малой мощности (3...200 кВт). ВСТГ выполняются двухполюсными с возбуждением от постоянных магнитов и при их проектировании важным являются выбор схемы обмотки и числа пазов на полюс и фазу q , влияющие на распределение МДС в воздушном зазоре, форму кривой ЭДС и энергетические характеристики генератора [1].

В работе рассматриваются трёхфазные обмотки ВСТГ с числом пазов на полюс и фазу равным 2, 3 и 4. Значения q выбраны целыми исходя из технологичности изготовления обмоток: простой процесс укладки двухслойной петлевой обмотки, низкая трудоёмкость намотки и сборки. Увеличение q способствует улучшению формы кривой ЭДС за счёт лучшего распределения МДС и подавления высших гармоник магнитного поля, что положительно сказывается на качестве выходного напряжения генератора. Кроме того, при значении $q > 1$ возможно выполнение обмотки с укорочением шага, что способствует уменьшению длины лобовых частей обмотки и снижению мощности потерь в генераторе [2].

Целью исследования является анализ влияния числа пазов на полюс и фазу на характеристики машины. Для анализа использовалось имитационное компьютерное моделирование (ИКМ) магнитного поля в программном комплексе Ansys Motor-CAD, позволяющем учитывать реальную геометрию активной зоны электрических машин.

Работа носит поисковый характер и направлена на выбор рациональной конфигурации обмотки на раннем этапе проектирования ВСТГ. Полученные данные позволяют обоснованно подходить к выбору числа пазов и схемы обмотки с учётом баланса между электромагнитными характеристиками и технологичностью производства.

Литература

1. **Балагуров, В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. — М.: Высшая школа, 1982.
2. **Кацман, М.М.** Электрические машины: в 2 ч. Часть II / М.М. Кацман. — М.: Академия, 2013.

А.С. Лискин, асп.; рук. С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ ПРОЯВЛЕНИЙ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ИХ РОТОРАХ

Электродвигатели с массивными роторами, в частности, гистерезисные электродвигатели, традиционно применяются в электроприводах. С одной стороны, в микроэлектроприводах устройств и систем ориентации, стабилизации, навигации, управления движением летательных аппаратов [1, 2], технологических машин по получению чистых и сверхчистых веществ, по выпуску химических волокон и нитей. С другой стороны, в высокомоментных электроприводах мобильных и стационарных объектов [3].

Массивный ротор — сплошной ферромагнитный цилиндр выполняет функции магнитопровода и токопровода. Вращающееся магнитное поле, создаваемое статором, проникает в массив ротора и индуцирует в нём вихревые токи, создающие при взаимодействии с магнитным полем дополнительный индукционный электромагнитный момент. При разработке электродвигателей с массивными роторами особенно важен учёт вихревых токов в магнитопроводах и сильно выраженного поверхностного эффекта.

Новизна исследований подтверждается направлениями работ ведущих организаций, среди которых АО «НПЦ АП имени академика Н.А. Пилюгина», Дальневосточный федеральный университет, Всероссийский электротехнический институт — ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», на базе которого выполняется данная работа в рамках подготовки кандидатской диссертации. Личный вклад автора:

- создание алгоритмов определения параметров слабого, смешанного и сильного электромагнитных полей в массивном магнитном материале;
- анализ и обобщение экспериментальных данных о проявлениях вихревых токов в роторах гистерезисных электродвигателей;
- создание алгоритма определения динамических характеристик электромагнитного поля в массивном роторе гистерезисного электродвигателя.

Перспективы использования полученных результатов обусловлены направлениями исследований ведущих профильных организаций.

Литература

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. Том 28. №2 (109), 2020 / (Статья по докладу на Европейской конференции по управлению (European Control Conference — ECC 2020)).
2. **С.Ю. Останин, П.С. Рудник.** Совершенствование программных средств автоматического проектирования гистерезисных электроприводов // Труды ФГУП «НПЦ АП» имени академика Н.А. Пилюгина. 2016. № 1 (35). — С. 46–53.
3. **Космодамианский А.С.** и др. Электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава: монография. — Saarbrücken: LAMBERT, 2011.

Н. Абдугалиев, студ.; рук. С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С МАССИВНЫМИ РОТОРАМИ В СОСТАВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Гистерезисные электродвигатели [1, 2] традиционно применяются в прецизионном электроприводе в гироскопических системах повышенной, высокой и сверхвысокой точности, в системах автоматики и управления, факсимильной связи, в том числе, при реализации новейших технологий факсимильной связи [2]. Также такие электродвигатели широко применяются в системах для получения чистых и сверхчистых веществ, в технологических машинах химической и текстильной промышленности [2, 3] и других. Новые перспективы и актуальные аспекты во многом связаны с исследованием и совершенствованием систем управления гистерезисными электродвигателями с массивными роторами в электроприводах.

Развитие систем управления гистерезисными электродвигателями, наряду с совершенствованием их конструкций, применением новых материалов роторов, новых методов и способов их обработки, обеспечивает наиболее полное использование потенциальных возможностей этого класса электродвигателей и электроприводов и повышение их энергоэффективности. Важное направление развития систем управления гистерезисными электродвигателями связано с управлением ими с использованием импульсного намагничивания ротора импульсами тока в цепях статора.

Новизна проведённых исследований подтверждается направлениями работ ведущих профильных организаций, в числе которых Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» — «НИИПМ им. академика В.И. Кузнецова», ФГУП «НИИСВ с экспериментальным заводом» (г. Тверь) и др. Личный вклад автора:

- анализ структурных схем и вариантов реализации систем амплитудного и импульсного управления гистерезисными электродвигателями;
- математическое моделирование и исследование указанных систем управления электродвигателями такого типа в составе электропривода;
- расчётно-теоретическое исследование базовых вариантов управляемого гистерезисного электропривода технологических систем.

Перспективы использования результатов обусловлены направлениями исследований и практических разработок профильных организаций.

Литература

1. **Тарасов В.Н., Останин С.Ю.** Разработка научных основ и технических решений для автоматизации и роботизации роторных и центрифужных технологий // Доклады IX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.). С.-Пб. 2004. 187 с. С. 127–131.
2. **Л.И. Коротева, Е.Ю. Коротева.** Технология и оборудование для получения волокон и нитей специального назначения. М.: Инфра-М. 2015. 288 с.

И.А. Федоров, асп.; рук. С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В современных условиях существенно возрастает степень электрификации различных видов транспорта, в том числе водного транспорта и эта тенденция будет усиливаться в долгосрочной перспективе [1–3]. Основными элементами соответствующего электрооборудования являются электрические машины, в том числе высокомоментные магнитоэлектрические электродвигатели для электроприводов автономных объектов водного транспорта. Поэтому проектирование и комплексное исследование указанных электродвигателей и электроприводов является актуальным [1–3].

Новизна проведённых исследований подтверждается направлениями работ Всероссийского электротехнического института — ВЭИ — филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», в котором выполняются исследования, представленные в докладе, Дальневосточного федерального университета (Владивосток) и других ведущих профильных организаций. Личный вклад автора состоит в следующем:

- обзор и анализ структурных схем и элементов высокомоментных электроприводов объектов электрического водного транспорта;
- анализ конструкционных вариантов магнитоэлектрических электродвигателей для электроприводов рассматриваемых объектов;
- проектные и поверочные электромагнитные расчёты базовых вариантов магнитоэлектрических электродвигателей и электроприводов;
- анализ и обобщение данных экспериментальных исследований прототипов вариантов электродвигателей и электроприводов.

Перспективы использования результатов обусловлены актуальностью проектирования и комплексного исследования высокомоментных электродвигателей и электроприводов мобильных объектов, а также научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами Всероссийского электротехнического института — ВЭИ — филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», на базе которого выполняется данная работа в рамках подготовки кандидатской диссертации.

Литература

1. **Космодамианский А.С.** и др. Электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава: монография. Saarbrücken: LAMBERT. 2011.
2. **Антоненко С.В.** Судовые движители: учебное пособие / С.В. Антоненко; Дальневосточный государственный технический университет. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2007. 126 с.
3. **Гайкович А.И.** Основы теории проектирования сложных технических систем. — СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ». 2001. — 423 с.

В.Д. Ильин, студ.; рук. М.Ю. Румянцев, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе описываются аддитивные технологии для производства ключевых компонентов электродвигателей. Селективное лазерное плавление (SLM) применяется для изготовления обмоток из медных сплавов с добавлением 0,3% углеродных нанотрубок (проводимость 95% IACS), что обеспечивает прочность в условиях центробежных нагрузок до 100 МПа [1]. Электронно-лучевое плавление (EBM) используется для производства корпусных деталей и несущих конструкций из титанового сплава Ti-6Al-4V с нанодобавками бора, что снижает массу на 35% при сохранении прочности 100 МПа. Печать форм для литья (Binder Jetting) позволяет создавать песчаные формы со встроенными спиральными каналами охлаждения диаметром 1–2 мм для производства корпусов машин.

Системы охлаждения интегрируются непосредственно в обмотки: в медных проводниках формируются внутренние микроканалы диаметром 200 мкм, по которым циркулирует диэлектрическая охлаждающая жидкость. Это снижает термическое сопротивление на 45% и позволяет увеличить плотность тока на 25%. Технология применяется в промышленности: Apple использует EBM для производства корпусов часов Watch Ultra 2 из 100% рециркулированного титанового порошка, Tesla внедряет 3D-печатные компоненты из алюминиевого сплава AlSi10Mg с 5% SiC в систему охлаждения корпусов двигателей Model Y.

Снижение эксплуатационных расходов достигается за счет повышения КПД на 2–4%, увеличения срока службы компонентов и сокращения затрат на техническое обслуживание. Экономический анализ показывает окупаемость технологии за 2–3 года для двигателей мощностью 10–100 кВт [2, 3].

Литература

1. **Zhang L. et al.** Thermal Management Optimization in 3D-Printed Electric Motors // Applied Thermal Engineering. 2024. V. 245. P. 122389.
2. **Wang X., Li Z.** Economic Analysis of Additive Manufacturing in Electric Motor Production // Int. J. of Production Economics. 2024. V. 272. P. 109258.
3. **NREL.** Manufacturing and Additive Design of Electric Machines by 3D Printing (MADE3D) // Technical Report. 2024. № NREL/TP-5400-86432.

*А.С. Беспалов, студ.; А.П. Планкин, ст. преп.;
рук. Б.Р. Липай, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УМЕНЬШЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В РОТОРАХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ МАЛОМОЩНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ДВС АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В настоящее время актуален вопрос эффективного использования энергии, особенно энергосистемами в составе автономных объектов. При этом, перспективным направлением является утилизация низкопотенциального тепла (например тепла выхлопных газов ДВС) микротурбинными энергоустановками малой мощности.

Возможность их применения в составе СЭС автономных объектов обусловлена рядом достоинств основного звена таких установок — высокоскоростного турбогенератора. Отсутствие редуктора (привод генератора идёт напрямую от турбины), следствием чего является сверхвысокая частота вращения ротора; безваловая конструкция ротора (несущую функцию выполняет бандаж магнита, который удерживает его от выкрашивания); применение газодинамических подшипников вместо подшипников с телами качения в совокупности дают хорошие массогабаритные параметры, а отсутствие контактных узлов обеспечивает повышенную надёжность.

В свою очередь, отрицательно сказаться на надёжности может локальное размagnичивание постоянного магнита, из-за перегрева под действием вихревых токов в роторе турбогенератора. В связи с этим, особенно актуально исследование способов уменьшения их плотности в постоянном магните, проведённое на базе турбогенератора мощностью 3,5 кВт с учётом специфики применения на автономных объектах.

Увеличение воздушного зазора на 0,5 мм снизило плотность вихревых токов в два раза, но привело к увеличению массогабаритных параметров; электропроводящая втулка, вставленная по диаметру расточки статора, полностью исключила вихревые токи из постоянного магнита, но такое решение требует более интенсивного охлаждения генератора, что не всегда возможно на борту автономного объекта; увеличение фазности обмотки генератора с трёх до шести снизило плотность вихревых токов до 14% от начального значения, но привело к увеличению лобовых частей.

Результаты исследования имеют практическое значение и могут быть использованы при проектировании турбогенераторов.

*К.А. Сухих, студ.; А.В. Соловьев, асп.;
рук. И.А. Косорлуков, к.т.н., доц. (СамГТУ, Самара)*

УСТРОЙСТВО МЕЖФАЗНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СЕТЯХ 0,4 кВ

В данной работе разрабатывалось устройство для перераспределения мощности однофазных потребителей в сетях 0,4 кВ.

Согласно указу Минэнерго РФ №2328 от 23.11.2024, первоочередной задачей становится интеграция передовых и экономически целесообразных технологий, нацеленных на улучшение функционирования распределительных электросетей. Действующие распределительные сети с напряжением 0,4 кВ отличаются значительным износом оборудования и устареванием используемых технологий.

Наша задача — создание прибора для автоматического перераспределения мощности между фазами для однофазных потребителей ориентировано на широкое использование в разнообразных типах сельских распределительных сетей. Качество прибора должно быть выше уже существующих аналогов. Сам прибор должен иметь низкие показатели стоимости и высокую надежность и неприхотливость в установке и эксплуатации.

При создании прибора, были использованы такие методы логики как булевы матрицы, теория вероятности. С их помощью была построена структурная схема аппарата и показан принцип его работы.

В завершение первого этапа разработки была собрана модель устройства. При ее сборке были использованы простейшие элементы электроники, благодаря которым себестоимость устройства относительно невелика.

Литература

1. **Петров А.В.** Качество электроэнергии в сельских сетях // Электрические станции. — 2020. — № 5. — С. 10–15.
2. **Сидоров К.В., Алексеев Е.Н.** Динамическая балансировка фаз с использованием тиристорных преобразователей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2021. — № 3. — С. 75–82.
3. **Приказ Минэнерго России №2328** «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы» от 23.11.2024.

А.И. Козлов, студ.; рук. Мье Мин Тант, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАШИННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ГЕНЕРИРУЮЩАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА И ТРЁХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА С ОДНОФАЗНЫМИ МОСТОВЫМИ МОДУЛЯМИ

В докладе представлено новое структурно-алгоритмическое решение машинно-электронной генерирующей системы второго типа (МЭГС-2) [1]. Система синтезирована на основе вентильного магнитоэлектрического генератора (ВМЭГ) с трехканальным гальванически развязанным выходом и трехфазного инвертора напряжения, выполненного по схеме трех однофазных мостовых инверторов (ТИН-ЗОМИ) [2].

Использование схемы ТИН-ЗОМИ вместо традиционных решений обеспечивает такие преимущества как: снижение рабочего напряжения на ключевых элементах в 2 раза, лучшее использование обмоток генератора, что снижает массу, а также высокое качество выходного напряжения за счет однополярной ШИМ, что позволяет уменьшить массу выходного фильтра. Важным достоинством устройства является устойчивая работа на несимметричную нагрузку и возможность масштабирования мощности по принципу многоканального преобразования.

ВМЭГ с трехканальным выпрямительным блоком, содержащим корректор коэффициента мощности, решает задачу стабилизации выходного напряжения при переменной частоте вращения вала и улучшает массогабаритные показатели системы. Минимизация массы выходного фильтра достигается оптимизацией его волновой проводимости.

Проведенное имитационное моделирование в среде OrCAD подтвердило работоспособность и преимущества предложенной системы. Рассмотренное решение является инновационным и перспективным для применения в авиационной электротехнике, требующим дальнейшей опытно-конструкторской проработки.

Литература

1. **Мыцык Г.С., Мье Мин Тант.** Вентильный магнитоэлектрический генератор с коррекцией входного коэффициента мощности его выпрямительного блока. Промышленная энергетика, 2022, № 12. — С.11–20.
2. **Г.С. Мыцык, Мье Мин Тант.** Трёхфазный инвертор напряжения повышенной мощности для солнечной фотоэлектрической станции. Патент РФ на изобретение № 2784845 МКИ: НО 2М 7/48. Опубл. 30.11.2022 г. в Бюл. № 30.

Г.И. Калинин, студ.; рук С.Ю. Останин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для электроприводов технологических и производственных машин и агрегатов различных отраслей промышленности, в частности, химической, текстильной и смежных с ними отраслей, необходимо обеспечение режима электрического синхронного вала [1]. Рабочие механизмы таких машин и агрегатов имеют следующие основные особенности: высокие моменты инерции, на 2–3 порядка превосходящие моменты инерции роторов приводных электродвигателей; необходимость синхронного вращения при переменных моментах сопротивления нагрузки, создаваемых механизмами, прямой пуск механизмов. Ближайший аналог приводного электродвигателя — наиболее распространённый в промышленности асинхронный электродвигатель с короткозамкнутой обмоткой на роторе.

Оптимальным в условиях, определяемых принципиальными особенностями рабочих механизмов рассматриваемых машин и агрегатов, является электропривод с гистерезисными электродвигателями [2], индивидуальными для каждого однотипного механизма в составе их группы, реализующий режим электрического синхронного вала.

Новизна и перспективы использования результатов подтверждаются направлениями исследований ведущих профильных организаций, в том числе НИИПМ, АО «АВЭКС», «ВНИИСВ», ОАО «Каменсковолокно» и др.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- обзор и анализ литературных источников по тематике исследования, проектно-конструкторских решений в области электропривода и систем управления им для машин и агрегатов рассматриваемого назначения;
- расчёт и исследование гистерезисного электродвигателя для привода рабочего механизма машины по выпуску химических волокон;
- расчёт и исследование электронного преобразователя с инвертором для управления гистерезисным электродвигателем в электроприводе.

Синхронный электропривод на базе гистерезисного электродвигателя позволяет увеличить электросбережение и качество продукции машин химической, текстильной и смежных с ними отраслей техники и промышленности, где необходимо синхронное вращение механизмов.

Литература

1. **Коротеева Л.И., Коротеева Е.Ю.** Технология и оборудование для получения волокон и нитей специального назначения. М.: ИНФРА-М. 2015. 288 с.
2. **Орлов И.Н., Никаноров В.Б., Селезнёв А.П., Шмелёва Г.А.** Проектирование гистерезисных двигателей на ЭВМ. М.: МЭИ. 1991. 128 с.

Н.В. Солдайкин, асп.;

рук. А.В. Пичуев, д.т.н., доц. (НИТУ МИСИС, г. Москва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДОБЫЧНОГО КОМБАЙНА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Развитие электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт предъявляет повышенные требования к надежной и безопасной эксплуатации горно-шахтного электрооборудования, для обеспечения которых необходимо исследование эффективности функционирования релейной защиты (РЗ) в электрических сетях напряжением 3,3 кВ с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП) добычного комбайна.

Установлено функциональное несоответствие существующей системы РЗ требованиям электробезопасности при оперативном контроле изоляции в подземной электрической сети на участках звена постоянного тока преобразователя частоты, а также участков промышленной и регулируемой частоты [1, 2]. Отмечено отсутствие эффективной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и рекомендаций по её настройке.

Целью исследований являлась оценка эффективности работы системы РЗ в подземных электрических сетях напряжением 3,3 кВ.

Разработана имитационная модель системы электроснабжения добычного комбайна, позволяющая исследовать различные виды междофазных коротких замыканий, в том числе замыканий на корпус.

Приведены результаты исследования спектрального состава тока и напряжения в силовой электрической сети и вторичных цепях измерительных трансформаторов в режимах однофазной и двухфазной утечки на землю (корпус) и междофазных коротких замыканий.

Приведены возможные пути повышения качества функционирования РЗ и направление дальнейших исследований по разработке новых способов защиты от ОЗЗ и оперативного контроля изоляции в подземной электрической сети напряжением 3,3 кВ.

Литература

1. **Пичуев А.В.** Обоснование методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий // Диссертация ... докт. техн. наук: 2.4.2 / Пичуев Александр Вадимович. — М.: 2023. — 383 с.
2. **Куницкий В.Г.** Разработка устройства защитного отключения для шахтных участков электрических сетей с частотно-регулируемым электроприводом напряжением до 1000 В: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Куницкий Виталий Григорьевич. — М., МГТУ, — 1996. — 23 с.

Секция 25

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Electrical and electronic apparatuses

Председатель секции: к.т.н., доцент Киселев Михаил Геннадьевич

Секретарь секции: Конюшенко Елизавета Владимировна

М.С. Алферов, асп.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТБРОСА КОНТАКТОВ ВАКУУМНОГО ВКЛЮЧАЮЩЕГО АППАРАТА

Ключевой особенностью включающего аппарата является его режим работы, он предназначен для включения испытательной цепи лаборатории большой мощности на токи короткого замыкания. Пик тока короткого замыкания в лаборатории большой мощности, оснащённой ударным генератором ТИ-100 может достигать значения в 330 кА [1].

Вакуумные выключатели, распространённых в промышленности конструкций, не способны оставаться замкнутыми при токах короткого замыкания 160 кА ввиду наличия торцевых контактов в конструкции вакуумной дугогасительной камеры. Предложенная в докладе [2] конструкция вакуумного включающего аппарата с многоточечным контактом обладает большим током электродинамической стойкости.

Данная работа посвящена исследованию проблем, связанных с отбросом контактов при протекании сквозных токов короткого замыкания в вакуумном включающем аппарате.

Полученные результаты исследования показывают зависимость усилия поджата, необходимого для удержания контактов в замкнутом состоянии, от количества контактных пальцев многоточечного контакта.

Литература

1. **Федченко И.К.** Техника высоких напряжений. Киев.: Вища школа, 1969. с. 63–68.
2. **Алферов М.С., Дергачев П.А.** Вакуумный включающий аппарат для лаборатории большой мощности // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. — Москва: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2025. — С. 488.

В.К. Годяев, студ.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДКОВ

Высоковольтные вводы рассматриваются как критически важные элементы энергетических систем. Надежность вводов напрямую влияет на стабильность работы электрических сетей, особенно в условиях высоких напряжений и сложных эксплуатационных режимов [1].

В программе COMSOL Multiphysics создана модель для оптимизации конструкции ввода в соответствии с заданными требованиями. Моделирование включает электростатический расчет и анализ тепловых процессов.

Рассмотрены различные конфигурации обкладок, включая переменные расстояния между ними. Выполнено моделирование теплового состояния ввода с учетом материала изоляции, потерь, свойств среды и граничных условий. Расчет показывает, что максимальная температура в конструкции не превышает 80 °С, а температура трансформаторного масла не превышает 95 °С, что соответствует требованиям ГОСТ (рис. 1).

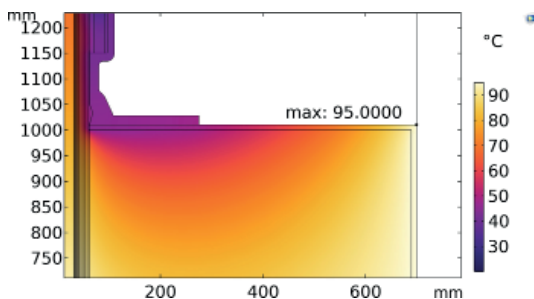


Рис. 1. Распределение электрического поля в высоковольтном вводе

Литература

1. Славинский А.З., Сипилкин К.Г., Кассихин С.Д., Никтин Ю.В., Кирюхин П.В. Высоковольтные вводы для систем постоянного тока. Проектирование, изготовление, испытания. ООО «Мосизолятор», 32 стр., 2015.

М.Ю. Козеной, студ.; рук. К.В. Крюков, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ РЕГУЛЯТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрена методика симуляции преобразователя на основе аппаратно-программного моделирования (Hardware in the loop), применяемая в области силовой электроники. Для создания виртуальной модели составляется система дифференциальных уравнений, с помощью которых можно описать работу понижающего регулятора:

$$\begin{aligned} I_L &= C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R} \\ U_C &= E - L \frac{di_L}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_L &= C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R} \\ 0 &= L \frac{di_L}{dt} + U_C \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1–2) представляются в виде конечных разностей, где задается шаг дискретизации и время, описывающее переключение между уравнениями. С помощью специального языка для моделирования электрических схем Verilog HDL составляется блок-схема на основе полученных систем уравнений.

После описания работы преобразователя модель верифицируется с аналогом, созданным в вспомогательной программе для моделирования и симуляции систем.

В результате проведения симуляции аппаратно-программная система позволяет быстро смоделировать рабочую среду и аварийные режимы. Использование модели позволяет провести тестирование прототипа регулятора в реальном времени с виртуальными элементами, максимально приближенными к настоящим [1].

Литература

1. J. Mina, Z. Flores, E. López, A. Pérez and J.-H. Calleja, "Processor-in-the-loop and hardware-in-the-loop simulation of electric systems based in FPGA," 2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP), Guanajuato, Mexico, 2016, pp. 172–177.

С.А. Шаров, асп.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

В последнее время активно распространяются распределительные сети постоянного тока, что требует разработки и применения новых систем управления режимами, а также аппарата способного обеспечить подключение, надежное функционирование и согласованную работу новых типов оборудования в электрических сетях [1]. На роль такого аппарата подходит преобразователь энергии на основе твердотельного трансформатора [2].

В работе рассчитаны параметры схемы преобразователя, такие как токи и напряжение нагрузки, ёмкость и индуктивность резонансного контура, частота тока в высокочастотной части. Была разработана модель в программном комплексе Matlab Simulink для модульной топологии преобразователя. В модели (рис. 1) имитируются разные режимы нагрузки и посредством системы управления обеспечивается постоянное напряжение на нагрузке.

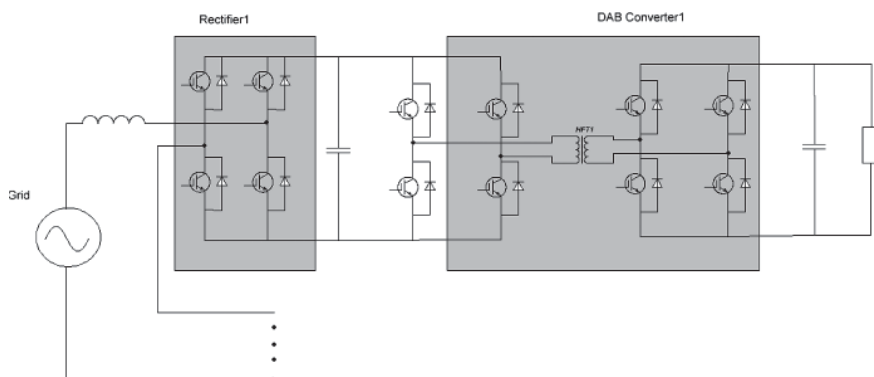


Рис. 1. Преобразователь на основе твердотельного трансформатора

Литература

1. **Коптяков А.С., Джассим Х.М.,** проектирование и построение резонансного преобразователя LLC с широким диапазоном напряжений для быстрой зарядки электромобилей // вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 51.
2. **Rothmund, D., Guillod, T., Bortis, D., & Kolar, J.W.** (2019). 99.1% Efficient 10 kV SiC-based medium-voltage ZVS bidirectional single-phase PFC AC/DC stage. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 7(2), 779–797.

*И.В. Смоляков, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, к.т.н., доц.;
П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Обеспечение надежности и безопасности высоковольтных элегазовых выключателей является важной задачей в электроэнергетике [1]. В работе представлена разработка методики испытаний электрической прочности изоляции выключателя ЛТВ-150Н1 на напряжение 150 кВ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52565 [2], ГОСТ 1516.3 [3] и стандартов организации.

В рамках исследования разработаны программы и методики проведения трёх ключевых видов испытаний: грозовым импульсом напряжением 650/750 кВ (рис.1), одноминутным напряжением промышленной частоты 300 кВ в сухом состоянии и под дождём, а также напряжением 109 кВ промышленной частоты при нулевом избыточном давлении элегаза. Применены современные измерительные системы, такие как цифровая импульсная система TR-AS 100-12/2 и вольтметр ВА11, обеспечивающие высокую точность измерений.

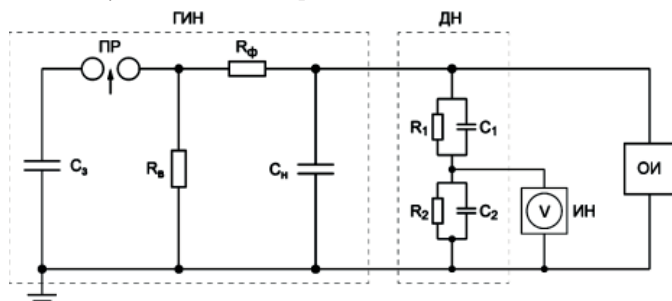


Рис. 1. Схема испытательных и измерительных цепей при проведении испытаний грозовыми импульсами

Результаты испытаний подтвердили соответствие изоляции выключателя ЛТВ-150Н1 установленным нормативам: все 15 импульсов грозового испытания пройдены без пробоев, одноминутные испытания в сухом состоянии и под дождём завершились успешно, а испытание при нулевом избыточном давлении показало способность аппарата выдерживать фазное напряжение в течение 60 минут. Разработанные методики внедрены в заводскую приёмку выключателей класса 150 кВ.

Литература

1. **Чунихин А.А., Жаворонков М.А.** Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **ГОСТ Р 52565-2006** Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
3. **ГОСТ 1516.3-96** Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

Д.А. Долотов, студ.; рук. П.А. Дергачёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ЭЛЕГАЗОВОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Современные требования к надежности и быстродействию коммутационных аппаратов в электроэнергетических системах обуславливают необходимость модернизации их ключевых компонентов, таких как электромагнитные приводы элегазовых выключателей. Одним из наиболее эффективных подходов к оптимизации конструкций является использование технологии цифровых двойников [1].

В работе рассматривается процесс модернизации электромагнитного привода на основе создания его точной цифровой модели в программной среде COMSOL Multiphysics.

Разрабатываемая цифровая модель является основой для анализа и оптимизации силовых и динамических параметров привода. Полученные данные позволят предложить конкретные инженерные решения по модернизации конструкции, направленные на повышение его надежности, быстродействия и ресурса.

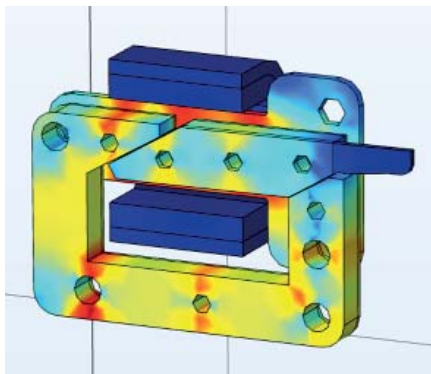


Рис. 1. Магнитный поток в электромагните

Литература

1. **Козлов А.Н.** Электромагнитные приводы коммутационных аппаратов: расчет и проектирование. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 280 с.
2. **Сидоров Г.М.** Применение цифровых двойников в системах мониторинга и диагностики электрооборудования // Электротехнические системы. — 2017. — Т. 15, № 4. — С. 78–85.
3. **E Rahimpour, D A** 2006 Analysis of temperature distribution in castresin dry-type transformers. Electrical Engineering, vol. 89, pp. 301–309.

Е.А. Калмыкова, студ.; рук. В.В. Рыжов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КУЛера С ТРАПЕЦИЕВИДНЫМИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАМИ

Актуальность исследования обусловлена ростом мощности компактной электроники и необходимостью создания эффективных систем охлаждения малых размеров. Термоэлектрические кулеры (ТЭК) на основе эффекта Пельтье обладают ключевыми преимуществами: отсутствие движущихся частей, бесшумность, точный термоконтроль [1]. Однако их широкому применению мешает относительно низкая энергоэффективность, что требует оптимизации конструкции, в частности, геометрии термоэлементов.

В среде COMSOL Multiphysics проведено трёхмерное моделирование и параметрический анализ двух конкурирующих конструкций: с классическими прямоугольными и перспективными трапециевидными термопарами [2]. Для трапециевидной геометрии выполнена оптимизация по критерию максимума коэффициента производительности путём варьирования высоты элементов в диапазоне 1,5–3,2 мм.

Результаты сравнительного моделирования показали, что трапециевидный ТЭК при прочих равных условиях достигает аналогичной максимальной разности температур ($\Delta T_{\max} \approx 72,8$ К), что и прямоугольный, но при значительно меньшем токе (3,20А против 4,21А). Это свидетельствует о более высокой энергоэффективности. Оптимизация высоты трапециевидных элементов выявила, что с её ростом до 3,2 мм КП устройства увеличивается с 1,629 до 1,648, а требуемый ток для достижения $\Delta T_{\max}$ снижается более чем в 2 раза. Наибольший практический интерес представляет конструкция с высотой термопар 2,5–2,8 мм, обеспечивающая оптимальный баланс между высокой эффективностью, компактностью и механической стабильностью.

Таким образом, использование трапециевидной геометрии термоэлементов является эффективным подходом к повышению энергоэффективности термоэлектрических охладителей для применения в портативной электронике, оптике и медицинской технике.

Литература

1. **Goldsmid H.J.** Introduction to Thermoelectricity. Springer, 2010.
2. **Lin S., YuJ.** Optimization of a trapezoid-type two-stage Peltier couples // Int. Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 65.

Д.С. Беднов, студ.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ШКАФА С УСТАНОВЛЕННЫМ АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

Предварительная оценка температуры внутри шкафа является актуальной задачей для целого ряда электротехнических решений. Одна из таких систем — электротехнический шкаф (рис. 1), в которой решение обозначенной проблемы позволит повысить эффективность охлаждения шкафа, тем самым снизить влияние повышенных температур на номинальную отключающую способность автоматического выключателя [3]. В данном исследовании предлагается изучить имеющиеся материалы исследований в этой области.

Автоматический выключатель является устройством, чьи параметры зависят от температуры внутренних компонентов и окружающей среды [1]. С ростом температур действительные характеристики могут сильно отличаться от заявленных [2].

Ознакомление с современными способами анализа системы охлаждения электротехнического шкафа, позволит подобрать наиболее оптимальный способ создания алгоритма расчета.



Рис. 1. Электротехнический шкаф

Литература

1. **Yang S. et al.** Experimental study of a model predictive control system for active chilled beam (ACB) air-conditioning system // *Energy and Buildings*. — 2019. — Т. 203. — С. 109451.
2. **Robinson A.J. et al.** Passive two-phase cooling of air circuit breakers in data center power distribution systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2020. — Т. 121. — С. 106138.
3. **Niu C. et al.** Simulation and experimental analysis of arc motion characteristics in air circuit breaker // *Plasma Science and Technology*. — 2016. — Т. 18. — №. 3. — С. 241.

Н.В. Вергун, студ.; рук. К.В. Крюков, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОТЛАДКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

В условиях быстрого развития технологий и требований к системам управления, необходимость создания программно-аппаратных комплексов для тестирования и отладки систем становится все более актуальной. Одним из эффективных решений является использование программируемых логических интегральных схем (FPGA) [2].

Основная цель работы — создание математической модели системы управления для DC-DC регулятора и её интеграция на платформе FPGA (рис. 1). Используется MATLAB/Simulink для симуляции работы системы, а также язык Verilog для создания HDL-кода для FPGA [1].

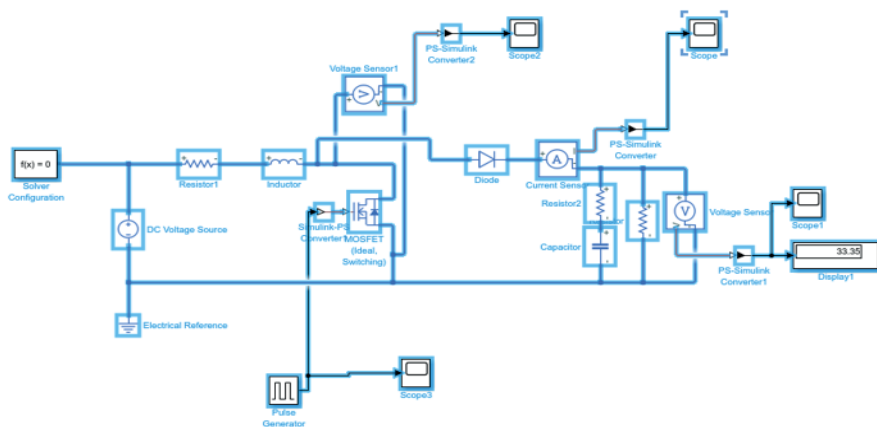


Рис. 1. Схема DC-DC регулятора

Для верификации и тестирования системы применяется метод Hardware-in-the-Loop [1], который позволяет проверять взаимодействие модели на FPGA с реальными устройствами.

Разработка комплекса позволяет значительно улучшить процессы отладки и тестирования систем управления, ускорить создание прототипов и повысить точность функциональных алгоритмов.

Литература

1. **Купцов А.В.** Обобщенная схема сшивания с использованием стабилизирующей математической модели реального объекта при HIL-моделировании / А.В. Купцов // Известия ТРТУ. — 2006. — № 9-1(64). — С. 11–12. — EDN KTYTIT.
2. Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов: в 9 частях, Новосибирск, 03–07 декабря 2018 года / Под ред. Гадюкиной А.В. Том Часть 6. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. — 181 с. — ISBN 978-5-7782-3739-1. — EDN YVJHPV.

Д.С. Андриянова, студ.; рук. К.В. Крюков, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РЕГУЛЯТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ СИСТЕМ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В настоящее время вопрос выработки и использования экологически чистой энергии является особенно важным. Преобразование солнечной энергии в электрическую является одним из наиболее перспективных направлений в альтернативной энергетике [1]. Это преобразование осуществляется с помощью фотоэлектрических модулей. Но основным недостатком систем с фотоэлектрическими модулями является то, что эффективность их работы сильно зависит от температуры окружающей среды и солнечной инсоляции [2]. Регуляторы постоянного тока позволяют регулировать и поддерживать в системах с фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) необходимый уровень выходных параметров, таких как ток и напряжение (рис. 1). А в комплексе с ТММ-контроллером также помогают обеспечить работу системы в режиме максимальной мощности.

В данной работе был произведён теоретический расчёт и численное моделирование регулятора топологии SEPIC в программном комплексе OrCAD/PSpice. В ходе моделирования были получены и проанализированы ключевые характеристики регулятора: входная, регулировочная и нагрузочная. Данные характеристики позволили более точно оценить параметры основных компонентов регулятора. В результате был собран макет регулятора постоянного тока и выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных с целью исследования эффективности использования данной топологии в системах с фотоэлектрическими преобразователями.

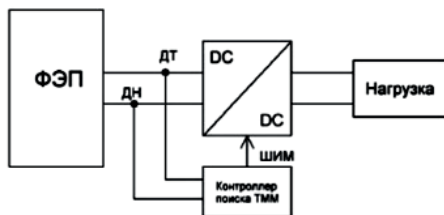


Рис. 1. Схема подключения регулятора постоянного тока к ФЭП

Литература

1. Минин А.А., Матрунчик А.С. Перспективы использования фотоэлектрических преобразователей в мире и в России // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7, № 1. — С. 74–81.
2. С.Г. Обухов, И.А. Плотников. Моделирование и исследование режимов работы солнечной фотоэлектрической станции с контроллером максимальной мощности // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» © Научно-технологический центр «ТАТА», 2015. № 13–14 (177–178). С. 38–50.

*К.Ю. Поляков, студент;
Ю.Б. Церковский, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ПЛИС

Современные тенденции развития силовой электроники требуют повышения эффективности, точности и адаптивности систем управления преобразователями постоянного тока. В данной работе рассматривается разработка универсальной цифровой системы управления понижающим регулятором постоянного тока (Buck converter) на основе ПЛИС с использованием ПИД- и СМС-регуляторов (регуляторов скользящего режима) [1]. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Проведено исследование теоретических основ ПИД- и СМС-регуляторов;
- Реализованы модели преобразователя и систем управления в MATLAB Simulink;
- Разработаны цифровые алгоритмы на языке Verilog для аппаратной реализации регуляторов;
- Проведено имитационное моделирование работы системы в среде ModelSim (рис. 1).

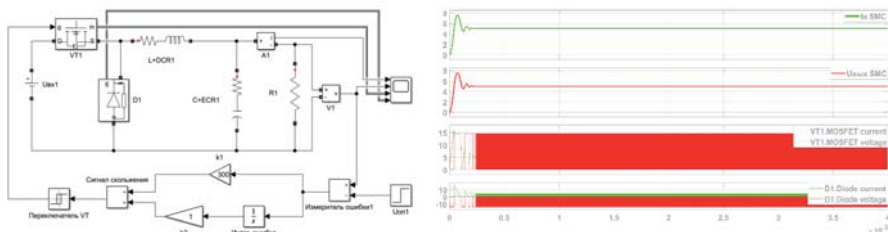


Рис. 1. Схема моделирования понижающего СМС-регулятора и график переходного процесса в MATLAB Simulink

Алгоритмы цифровой реализации основаны на разностных уравнениях, которые позволяют выполнять дискретную обработку сигналов с заданным временем дискретизации [2].

Литература

1. **Н. Guldemir**, Study of sliding mode control of DC-DC buck converter, Energy and Power Engineering, vol. 3, pp. 401–406, Sep. 2011.
2. **Смит С.** Понимание цифровой логики и Verilog HDL. — М.: ДМК Пресс, 2016.

Р.Г. Апальков, асп.;
рук. М.Г. Киселев, к.т.н., зав. каф. (НИУ «МЭИ»)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧУКА С ВЗАИМОИНДУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Трансформаторные стабилизаторы с переменным коэффициентом трансформации широко используются для стабилизации переменного напряжения [1]. Недостатком таких стабилизаторов является низкая скорость реагирования на изменение напряжения сети.

В работе исследуется применение импульсного преобразователя Чука с взаимоиндуктивными компонентами (рис.1) для стабилизации напряжения

сети с высоким быстродействием, позволяющим реагировать на входные короткие импульсы напряжения. В отличие от других схем импульсных преобразователей, преобразователь Чука имеет фильтр тока на входной цепи и выходной цепях.

Параметры основных пассивных компонентов рассчитываются по следующим формулам:

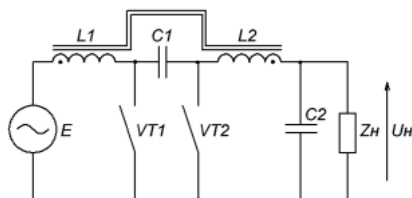


Рис. 1. Схема стабилизатора на основе преобразователя Чука

$$L_1 = L_2 = \frac{E \cdot \gamma}{2 \cdot f \cdot \Delta I_L} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{E \cdot \gamma^2}{f \cdot (1 - \gamma) \cdot Z_H \cdot \Delta U_{C1}} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{E \cdot \gamma}{8 \cdot f^2 \cdot \Delta U_{C2} \cdot L_2} \quad (3)$$

Результаты расчета модели показали, что взаимоиндуктивные компоненты стабилизатора уменьшают пульсации напряжения. Кроме того, стабилизатор выполняет функцию за тысячную часть периода сетевого напряжения и позволяет дополнительно выполнять функцию фильтрации высших гармоник входного напряжения.

Литература

1. **Martinez-S.L.** Analysis of a bidirectional coupled-inductor Cuk converter operating in sliding mode // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. — 2002. — Т. 45. — №. 4. — pp. 355–363.

Т.Р. Игнатьев, студ.; рук. М.Г. Лепанов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА С РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ МОДУЛЯЦИИ И СТРУКТУРАМИ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Широкое применение силовых электронных преобразователей в современных энергосистемах приводит к снижению качества электроэнергии из-за генерации высших гармоник. Внедрение возобновляемых источников энергии требует их согласования с сетью. В этих условиях возрастает необходимость использования сетевых регуляторов, обеспечивающих обмен энергией между накопителем и сетью посредством управления активной мощностью. Также такие устройства позволяют реализовать функции компенсации реактивной мощности и активной фильтрации гармоник тока. Эффективность сетевого регулятора и его электромагнитная совместимость с сетью определяются алгоритмами управления и характеристиками выходного фильтра преобразователя [1].

Исследуемый сетевой регулятор реализуется на базе трехфазного инвертора напряжения. Качество формируемого тока определяется выбранной стратегией коммутации силовых ключей и конфигурацией пассивного фильтра. Проводится сопоставление двух методов управления: синусоидальной и векторной широтно-импульсной модуляции. Векторная модуляция позволяет повысить эффективность использования емкостного накопителя энергии за счет увеличения относительной амплитуды выходного напряжения инвертора. Для подавления высокочастотных модуляционных гармоник рассматриваются различные структуры выходного фильтра: L и LCL . Выбор LCL -фильтра позволяет улучшить гармонический состав тока регулятора, однако при его использовании необходимо учитывать возникновение резонансных явлений [2].

Для исследования сетевого регулятора выполнено моделирование в среде SimInTech. Получены зависимости гармонических искажений тока и потерь в преобразователе от частоты коммутации при различных методах модуляции, а также проведен анализ влияния типа фильтра и его параметров на характеристики устройства.

Литература

1. **Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А.** Силовая электроника. — М.: изд. МЭИ, 2009.
2. **Büyük M., Tan A., Bayindir K.Ç., Tümay M.** Analysis and comparison of passive damping methods for shunt active power filter with output LCL filter // Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP). — 2015.

В.А. Кочнев, студ.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН) обладают высокой эффективностью, быстродействием и длительным сроком службы, что делает их перспективными для современных энергосистем [1, 2]. Основным ограничением остаётся высокая стоимость сверхпроводящей ленты. Поэтому разработка способов, позволяющих уменьшить расход сверхпроводника при сохранении требуемой энергоёмкости накопителя, имеет ключевое значение.

В программе COMSOL Multiphysics создана электромагнитная модель соленоидальной обмотки сверхпроводящего индуктивного накопителя. На основе модели определено распределение магнитного поля, критический ток и индуктивность обмотки. Разработана методика параметрической оптимизации СПИН и реализована программа на языке программирования Julia, позволяющая по данным моделирования вычислять запасаемую энергию, рабочий ток, длину ВТСП проводника и подбирать конструкцию с минимальным расходом сверхпроводника. Определены рабочие характеристики СПИН, включая вольтамперную характеристику и зависимость сопротивления от тока. Оптимизационный алгоритм позволил выбрать геометрию, минимизирующую длину ВТСП ленты для заданной энергоёмкости.

Сравнение накопителя, рассчитанного вручную, и накопителя, рассчитанного с помощью программы, показало превосходство оптимизированного СПИН по удельной энергоёмкости и массогабаритным показателям. Разработанная методика применима для инженерного проектирования сверхпроводящих накопителей энергии.

Литература

1. **Shi J.** и др. Influence Analysis of SMES Magnet Design Scheme on Its Voltage Distribution Characteristic // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022. Т. 32, № 1. С. 1–11.
2. **Савина Н., Лисогурская Л., Лисогурский И.** Накопители электрической энергии как средство повышения надёжности и экономичности функционирования электрической сети // № 2(92) (2020). 2020. С. 66–70.

Е.А. Кутарев, студ.; рук. В.В. Рыжов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КРИОГЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

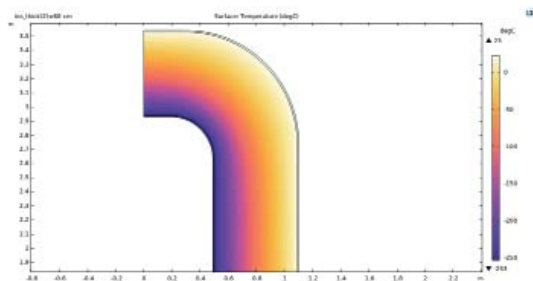


Рис. 1. Распределение температуры в стенке изоляции

В условиях стремительного развития авиационно-космической отрасли и перехода к экологически чистым источникам энергии особую актуальность приобретает использование жидкого водорода в качестве перспективного топлива. Его высокая энергоёмкость и нулевой углеродный след при сгорании открывают новые возможности для создания самолётов с нулевыми выбросами, а также для многоразовых космических систем. Однако практическое применение жидкого водорода сопряжено с рядом технологических вызовов — прежде всего, с необходимостью его безопасного и эффективного хранения при экстремально низких температурах в условиях ограниченных габаритов фюзеляжа воздушного судна.

Для решения поставленной задачи предлагается применить цифровой двойник криогенной ёмкости. Модель разработана в программном комплексе Comsol Multiphysics [1]. Функциональные возможности модели зависят от её настройки. В качестве базового прототипа при создании цифрового двойника использована геометрия действующей авиационной криогенной ёмкости.

Был произведён расчет времени бездренажного хранения водорода при разных типах изоляции с учетом необходимого потребления топлива. Также был произведен анализ температурного распределения по всей емкости. Результаты температурного моделирования приведены выше (рис. 1). Толщина изоляции составляет 60 сантиметров. Внутри криогенной емкости температура жидкого водорода около — 253 градусов Цельсия, снаружи температура окружающей среды 25 градусов Цельсия.

Литература

1. COMSOL Multiphysics® v. 6.2., www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

А.А. Иванов, студ.; рук. В.В. Рыжов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА ИЗОЛЯЦИИ ЁМКОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ LH2

Развитие водородной энергетики ставит перед отраслью задачу создания надёжных и экономически эффективных систем транспортировки жидкого водорода (LH2). Особая сложность проектирования обусловлена экстремально низкой температурой кипения LH2 -253 °C (20 K), что предъявляет жёсткие требования к уровню теплоизоляции.

Для решения обозначенных задач и поиска изоляции с лучшим коэффициентом теплопроводности целесообразно применить математическую модель изоляции, созданную в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Эта модель служит инструментом проектирования изоляции на основе заданных исходных параметров: геометрии и состава изоляции. Многофункциональность ПО обеспечивает комплексный учёт всех физических процессов и явлений, характерных для эксплуатации реальной изоляции.

При разработке математической модели изоляции криогенной емкости в качестве референса была взята геометрия вспененной изоляции с газом (аэрогель), а конкретно — с воздухом. За основной изоляционный материал выбран кварц, который является одним из лучших изоляторов тепла. Для данной модели был произведен расчет коэффициента теплопередачи при разных размерах воздушных полостей. Проведя расчет, мы получаем температурную модель ячейки, а также коэффициент теплопередачи.

Для дальнейших расчетов выбирается модель с наименьшей ячейкой воздуха $d=0,1$ мм с коэффициентом теплопередачи $1,546 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Литература

1. **COMSOL Multiphysics® v. 6.2.**, www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
2. Cellulose Aerogels for Thermal Insulation: Trends and Challenges September 2018, DOI:10.3390/coatings8100345, License CC BY 4.0.
3. **В.С. Суворова, М.Д. Шипицина, Е.А. Гришкова, Е.А. Чупрова, О.В. Логинова, Д.А. Богдашкин.** Перспективы развития хранения и транспортировки водорода в России: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого ППАО «ТГК-1».

*Н.С. Родькин, асп.; К.В. Крюков, ст. преп.;
рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВХОДНОГО ФИЛЬТРА ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ ФАЗ

Разработка методики расчета входного фильтра повышающего преобразователя с чередованием фаз является актуальной задачей в контексте современных систем возобновляемой энергетики, особенно при интеграции с нелинейными источниками питания, такими как топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ). Снижение пульсаций входного тока в таких преобразователях напрямую влияет на надёжность и срок службы источника энергии [1]. На сегодняшний день для уменьшения амплитуды токовых пульсаций применяются различные подходы: увеличение числа фаз (катушек индуктивности), введение дополнительных индуктивностей или специальные схемы коммутации, снижающие магнитное насыщение сердечников дросселей [2]. Хотя эти методы обеспечивают эффективное подавление пульсаций и возможность работы в широком диапазоне входных напряжений при низком уровне насыщения, они одновременно ведут к росту габаритов, стоимости и тепловыделения преобразователя, а также к усложнению его схемотехники за счёт дополнительных полупроводниковых компонентов. В связи с этим возникает необходимость в создании обоснованной и универсальной методики расчета входного фильтра, позволяющей находить оптимальный баланс между эффективностью фильтрации как основного показателя обеспечения долговечности работы преобразователя и ПОМТЭ.

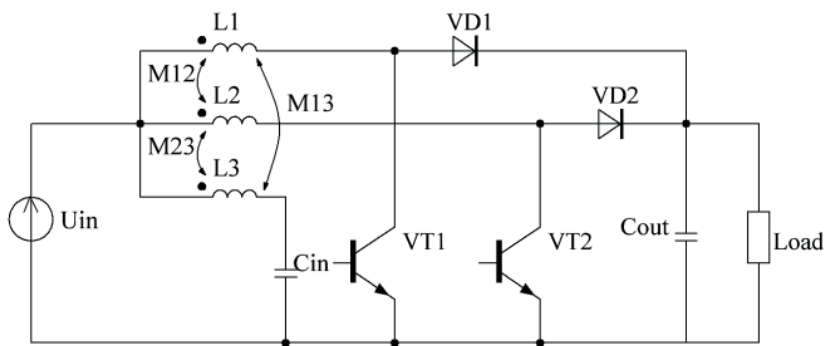


Рис. 1. Топология повышающего преобразователя с чередованием фаз

Литература

1. E.L.V. Eriksson, E. MacA. Gray «Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems — A critical review». Applied Energy, Volume 202, 2017, Pages 348–364, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.132>.
2. C. Yu, S.-Y. Cheng, T.-H. Shao and Y.-S. Lee, “Coupled inductor three-phase bidirectional buck/boost converter for energy storage application,” 2014 IEEE Region 10 Conference, Bangkok, Thailand, 2014, pp. 1–6, doi: 0.1109/TENCON.2014.7022320.

Г.Д. Индейкина, студ.; рук. В.В. Рыжов, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ЁМКОСТЕЙ

В связи с растущим значением криогенных топлив в энергетике особую актуальность приобретает проблема их эффективной теплоизоляции. В данном исследовании представлено численное моделирование теплопереноса в различных изоляционных системах для определения эквивалентного коэффициента теплопроводности.

Для эффективного моделирования были разработаны математические и численные модели, которые описывают распространение теплового потока через изоляционные материалы с учётом их структуры, состава и условий эксплуатации.

Всё моделирование происходило в единой среде, в современном программном обеспечении COMSOL Multiphysics, основанном на методе конечных элементов [1]. Моделирование проводилось для пяти различных типов изоляции. В результате получены распределения температуры, излучение с поверхности для различных типов изоляции, а также эквивалентные коэффициенты теплопроводности для каждого из материалов [2].

Таблица 1. Результаты нахождения эквивалентного коэффициента теплопроводности

Тип изоляции	Вакуум	Аэрогель	Полый порошковый материал (3M Glass Bubbles)	Цельный порошковый материал	MLI — изоляция
Значение эквивалентного коэффициента теплопровод- ности (Вт/(м · К))	0.030– 0.050	0.012– 0.020	0.004– 0.008	0.015– 0.030	0.0015– 0.005

Литература

1. COMSOL Multiphysics // www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
2. Heat Transfer Module User's Guide // COMSOL Multiphysics. COMSOL AB. Stockholm, Sweden. P. 147–150.

И.Н. Бурхан, студ.; рук. Е.П. Курбатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА КОНТАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

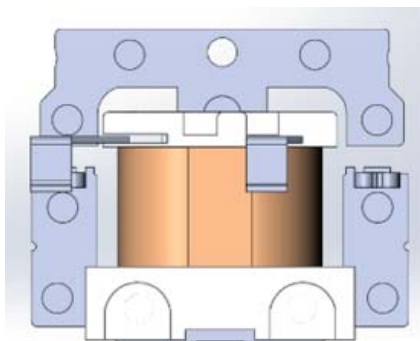


Рис. 1. Электромагнитная система контактора постоянного тока

ристиками. Оптимизация параметров конструкции аппарата позволяет снизить его материалоемкость.

В данном исследовании предлагается рассмотреть решения этих задач при помощи анализа электромагнитного привода контактора постоянного тока (рис. 1).

Анализ электромагнита контактора постоянного тока для решения поставленных в проекте задач проводился на основе созданных моделей в программах COMSOL Multiphysics и MatLab. На основе этой модели были проведены расчёты и получены графики сил, действующих на якорь электромагнита при его перемещении и токе, а также проведено моделирование контактной системы при различных токах. Кроме того, произведен анализ принципов действия различных типов электромагнитов, условий применения, что в совокупности даст представление об области применения каждого из представленных видов электромагнита и перспектив дальнейшего их развития.

Литература

1. H. Lin, X. Wang, S. Fang, P. Jin and S.L. Ho, «Design, Optimization, and Intelligent Control of Permanent-Magnet Contactor» in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 5148–5159, Nov. 2013.

Г.К. Силуянов, студ.; рук. Е.П. Курбатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В современной технике наблюдается рост использования двигателей с постоянными магнитами в силовых установках, что обусловлено их способностью обеспечить высокую плотность крутящего момента. Основная сложность в проектировании электрических машин с высококоэрцитивными магнитами заключается в необходимости совместить высокую удельную мощность с низкой стоимостью. Чтобы добиться этого, требуется максимально эффективно задействовать энергетические свойства постоянных магнитов.

Этим обусловлены постоянные поиски оптимальных конструктивных решений: варьирование геометрии, размеров и расположения магнитов, а также направление их намагничивания.

В работе проведено исследование трехмерной модели электродвигателя с постоянными магнитами, которая создана в программном обеспечении EasyMAG3D что представлено на рисунке 1. Результатом являются расчеты: реактивного, электромагнитного и суммарного моментов, получен график зависимости распределения потокоцепления в фазах и ЭДС XX от угла поворота ротора. Главное внимание уделялось геометрическому исследованию конструкции, в особенности, анализу влияния угла между постоянными магнитами на характеристики двигателя. Данные электромагнитного анализа позволяют получить точные входные параметры для последующего моделирования и исследования.

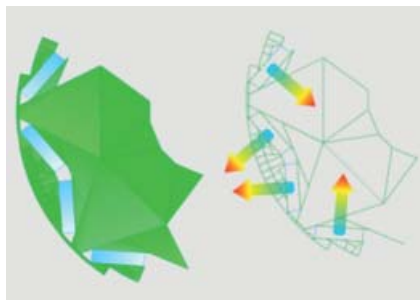


Рис. 1. Синхронный двигатель с V образными магнитами

Литература

1. M. Kitzberger, G. Bramerdorfer, S. Silber, H. Mitterhofer and W. Amrhein, "Influence of Hysteresis and Eddy Current Losses on Electric Drive Energy Balance in Driving Cycle Operation," 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Schweinfurt, Germany, 2018, pp. 1–7.
2. A. Krings and C. Monissen, "Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 1807–18.

С.А. Баурин, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА

Автоматизация инженерных систем в бытовом секторе является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений цифровизации. Комплексные решения «умного дома» позволяют повысить энергоэффективность, безопасность и комфорт проживания [1, 2]. Рост рынка IoT-устройств и формирование государственных стандартов подтверждают актуальность разработки надежных и совместимых систем автоматизации.

В работе выполнен обзор и сравнение современных проводных и беспроводных протоколов передачи данных, включая KNX, BACnet, LonWorks, X10, Ethernet, Wi-Fi, Z-Wave, ZigBee, Thread и Matter. Проанализированы их основные характеристики, такие как: топология, масштабируемость, надежность и особенности применения в бытовых системах. Изучены требования новых российских стандартов ГОСТ Р 71866–2024, ГОСТ Р 71870–2024, ГОСТ Р 71868–2024 и ГОСТ Р 71871–2024, регламентирующих проектирование и эксплуатацию систем умного дома.

Проведен анализ рынка умных устройств для систем освещения, микроклимата, контроля доступа и аварийной безопасности. Выполнено сравнение сенсоров, исполнительных механизмов и управляющих модулей разных производителей, выявлены ключевые параметры выбора.

Практическая часть посвящена проектированию электроснабжения и автоматизации загородного дома. Выполнен расчет розеточных групп и теплых полов, расчет освещенности, подбор аппаратов защиты. Разработаны алгоритмы автоматизации освещения, отопления, климат-контроля и систем безопасности, сформирована архитектура управляющей системы и подобрано оборудование.

Результатом исследования является комплексный проект системы электроснабжения и автоматизации жилого дома, обеспечивающий надежность, энергоэффективность и удобство эксплуатации.

Литература

1. **Кадырова Л.Ш.** Умный дом: идеология или технология // Международный научно-исследовательский журнал. — 2013. — С. 86–87.
2. **Карнаева Р.С., Синькова А.Д.** Возможности умного дома // Экономика и социум. — 2018. — № 10. — С. 318–312.

П.С. Зинчук, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ»

Исследование тепловых процессов является неотъемлемой частью проектирования и эксплуатации электрических аппаратов, поскольку перегрев может привести к преждевременной поломке или угрозе безопасности персонала. Целью данной работы является разработка лабораторного стенда для экспериментального изучения тепловых процессов и исследования тепловых режимов аппаратов стенда (рис. 1). Студенты проводят измерения в режиме реального времени с разными значениями токов, наблюдая за работой установки [1].

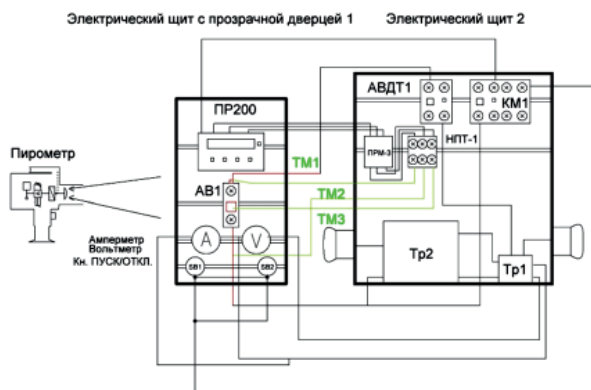


Рис. 1. Схематическое изображение лабораторного стенда

Стенд состоит из электрического щита, в котором находятся автоматический выключатель, кабели для соединения, программируемое реле с дисплеем, две кнопки управления (пуск и стоп) и три термометры [2]. Термометры установлены на ввод, на орган управления и на сам кабель [3]. Основные технические требования, установленные по стандарту: окружающая среда: -5°C до $+40^{\circ}\text{C}$; токоведущие части: до $+70^{\circ}\text{C}$ (шины, контакты, провода, клеммы); орган управления: до $+40^{\circ}\text{C}$ [4].

Литература

1. **Е.А. Кузнецова**, Испытание электрических аппаратов низкого напряжения: Методическое пособие по курсу «Испытание электрических аппаратов». — М.: Издательство МЭИ, 2014.
2. **ГОСТ 16962-71** «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний.».
3. **ГОСТ 60947-1; -2** «Аппаратура распределения и управления низковольтная».
4. **ГОСТ 306.30.2.1-2013 2** «Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры».

И.С. Есин, студ.; рук. Е.П. Курбатова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

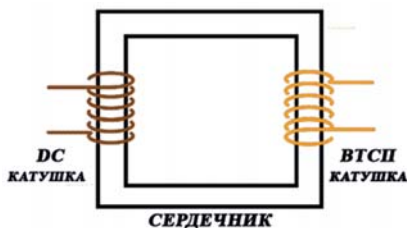


Рис. 1. Конструкция сверхпроводящего индуктивного ограничителя тока с насыщенным сердечником

Современные энергосистемы характеризуются ростом мощностей и интеграцией возобновляемых источников энергии, что повышает требования к надежности и защите от токов короткого замыкания. Особую актуальность эта проблема приобретает в высоковольтных сетях постоянного тока на основе преобразователей напряжения (VSC-HVDC), где традиционные средства защиты часто недостаточно эффективны [1].

Сверхпроводящие индуктивные ограничители тока с насыщенным сердечником представляют собой перспективное решение благодаря способности мгновенно ограничивать аварийные токи, минимальным потерям в нормальном режиме и функции самовосстановления [2]. Принцип действия устройства основан на управлении магнитным насыщением сердечника: в нормальном режиме сердечник насыщен и имеет низкое индуктивное сопротивление, а при КЗ — выходит из насыщения, резко увеличивая сопротивление и ограничивая ток.

В работе проведено компьютерное моделирование магнитной системы SISFCL в программной среде EasyMag3D. Построена 3D-модель устройства, рассчитан критический ток ВТСП-катушки и получена зависимость индуктивности от тока в медной обмотке. Результаты моделирования подтвердили резкий рост индуктивности при переходе сердечника из насыщенного состояния в ненасыщенное, что обеспечивает эффективное ограничение тока короткого замыкания.

Литература

1. **Shen B., Chen X., Fu L. et al.** Losses in the Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter for VSC-HVDC System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2021.
2. **Sotelo G.G., dos Santos G., Sass F. et al.** A review of superconducting fault current limiters compared with other proven technologies // Superconductivity. — 2022. — Vol. 3. — Art. 100018.

Н.А. Бобков, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ»

В работе будет представлено исследование восстанавливающегося напряжения (ВН) и разработка имитационной модели лабораторного стенда для его изучения. ВН является одним из основных нормируемых параметров высоковольтных выключателей. Его форма и амплитуда стандартизируются для того, чтобы гарантировать надежность коммутационной аппаратуры при различных условиях короткого замыкания.

Напряжение на коммутирующем элементе аппарата, нарастающее в процессе отключения цепи называется переходным восстанавливающимся напряжением (ПВН) [1]. ПВН представляет собой быстро затухающее колебание, частота которого определяется параметрами цепи (такими как индуктивность L и емкость C), которая оказывается подключенной к контактам выключателя. Скорость роста ПВН является одним из важнейших параметров, предъявляемых к выключателям. Чем выше эта скорость, тем сложнее выключателю погасить дугу [2].

Целью данной работы является создание имитационной модели лабораторного стенда ВН. Для достижения поставленной цели использован программный комплекс, позволяющий воссоздать реальные условия эксплуатации стенда. В программном обеспечении проведен расчет электрической схемы, позволяющей успешно провести моделирование ВН. На основе полученных результатов создана эффективная имитационная модель, которая позволяет достаточно точно предсказывать работу лабораторного стенда.

Литература

1. **Под ред. П.А. Курбатова.** — 5е изд., перераб. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2015. — 592 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература) / Основы теории электрических аппаратов.
2. **Чунихин А.А., Жаворонков М.А.** Ч-91 Аппараты высокого напряжения: Учеб. пособие для вузов — М.: Энерготомиздат, 1985 — 432 с., пл.

А.А. Калинин, студ.; рук. Е.В. Качалина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УТРОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

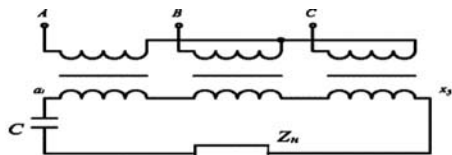


Рис. 1. Схема утроителя частоты

подобных систем оптимально подходят трансформаторные преобразователи: они дешевле и проще электродинамических, а также могут работать в условиях, при которых полупроводниковые элементы выходят из строя.

В рассматриваемой схеме на рисунке 1 используются три однофазных трансформатора, первичные обмотки которых соединены в «звезду», а вторичные — в «разомкнутый треугольник». Утроение частоты происходит благодаря насыщению магнитопроводов трансформаторов и генерации третьей гармоники.

Моделирование в MATLAB Simulink подтвердило формирование напряжения с утроенной частотой (150 Гц) и наличие высших гармоник. Для улучшения формы сигнала и компенсации реактивной мощности применяется компенсирующий конденсатор. Рекомендуется использовать электротехническую сталь, сохраняющую стабильность характеристик в условиях сильных магнитных полей.

Литература

1. **Рожанский Л.Л.** Статические электромагнитные преобразователи частоты. Москва — Ленинград: Госэнергоиздат, 1959.
2. **Рожанский, Л.Л.** Статические электромагнитные преобразователи частоты / Л.Л. Рожанский. — Москва : Издательский центр «Государственное энергетическое издательство», 1972. — 97 с.

А.А. Ковалев, студ.; рук. О.Н. Молоканов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА КОНТАКТОРА

Виртуальные лабораторные работы представляют собой современный и эффективный метод обучения, обладающий преимуществами доступности, безопасности и повторяемости экспериментов. Они расширяют возможности обучения, позволяют моделировать различные сценарии и способствуют углубленному пониманию научных дисциплин студентами. Электромагниты в контакторах выполняют роль ключевого элемента, обеспечивающего эффективное переключение больших электрических нагрузок. Они должны обеспечивать максимальную надежность и точность работы системы.

Основные методы исследования электромагнитных систем в контакторах включают аналитическое исследование, метод модельных экспериментов и компьютерное моделирование.

В данной работе рассматривается метод компьютерного моделирования на основе численного моделирования в программе для конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics. С помощью данного метода создается модель реального электромагнита контактора, имеющегося на кафедре, и на основе созданной модели разрабатывается виртуальный лабораторный стенд с возможностью исследования влияния различных факторов на работу электромагнитного привода контактора. В докладе представлена теоретическая справка об электромагнитах и разработан виртуальный лабораторный стенд, позволяющий изучить влияние различных факторов на электромагнит.

Литература

1. **В.П. Миловзоров.** Электромагнитные устройства автоматики — М.: Высшая школа, 1974. — 416 с.
2. **А.Г. Славинская.** Электромагниты и постоянные магниты — М.: Энергия, 1972. — 248 с.

И.Г. Ковалев, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитотвёрдые материалы широко применяются в электротехнических устройствах, датчиках, приводах и высокоэнергетических магнитных системах, где стабильность магнитных характеристик определяет надёжность всего изделия. Контроль параметров магнитотвёрдых материалов необходим на всех стадиях технологического процесса — от входного контроля сырья до испытаний готовых магнитов и сборок. Основными измеряемыми величинами являются магнитная индукция, остаточная индукция, коэрцитивная сила, энергоёмкость и форма петли намагничивания.

Для измерения магнитных характеристик используются различные приборы, обеспечивающие как лабораторную точность, так и возможность поточного контроля. Наиболее распространены гауссметры и тесламетры на основе датчиков Холла для измерения поверхностного магнитного поля; вибрационные магнитометры (VSM) и гистерезисграфы — для определения петли намагничивания и параметров B_r , H_c , $BH_{\max}$; импульсные гистерезисные установки — для высококоэрцитивных магнитов. Эти приборы обеспечивают оценку как локальных величин (распределение поля), так и интегральных магнитных свойств материала.

Методы контроля магнитотвёрдых материалов регламентируются действующими стандартами (в т.ч. ГОСТ Р 58885-2020), включающими: метод измерения петли гистерезиса; метод определения магнитной индукции на поверхности; контроль коэрцитивной силы; испытания на термостабильность; оценку однородности и дефектности магнитного материала. В докладе проводится сравнительный анализ этих методов с точки зрения точности, воспроизводимости, трудоёмкости и применимости для различных типов магнитотвёрдых материалов (NdFeB, SmCo, ферриты). На основе сравнения определены критерии выбора оптимального метода контроля в зависимости от требований к производству и назначению изделия.

Литература

1. **Мишин Д.Д.** Магнитные материалы: Учеб. Пособие для вузов — 2-е издание, перераб. и доп.: Высш. шк., 1991 — 384 с.
2. **ГОСТ 58885-2020** Магниты постоянные общепромышленного применения.

В.А. Агеев, асп.; рук. М.Г. Киселев, доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В связи с ростом роли возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи, а также накопителей энергии, применяемых в электромобилях, растет роль постоянного тока в энергетике. Благодаря этому встает вопрос об увеличении эффективности преобразования электроэнергии. Твердотельный трансформатор является перспективным решением оптимизации работы электросистемы с распределенными источниками и накопителями. Способность прямого преобразования среднего напряжения переменного тока в низкое напряжение постоянного тока, а также управляемость, повышенная эффективность и малые габариты делают его более актуальным вариантом в сравнении с классическим электромагнитным трансформатором.

Трехкаскадная топология твердотельного трансформатора является наиболее распространенной. Она включает в себя выпрямитель, сдвоенный активный мост постоянного тока и инвертор с ШИМ-модуляцией. Такая топология позволяет управлять потоком мощности в любом направлении, но при этом данный тип трансформатора имеет наиболее сложную конструкцию и систему управления.

В рамках работы была собрана компьютерная модель твердотельного трансформатора и произведено ее моделирование в номинальном режиме работы. В качестве нагрузки постоянного тока использовались пассивные элементы, эквивалентные легковому электромобилю. Были получены диаграммы тока и напряжения на входах и выходах блоков трансформатора.

Литература

1. **B.A. Avdeev and A.V. Vyngra**, "The Use Of Solid-State Transformers As Part Of Smart Grids," 2021 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1–10.

В.А. Жуков, студ.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., зав. каф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Технологии индукционного нагрева широко применяются в промышленности и быту благодаря энергоэффективности, экологичности и точной локализации тепла. Однако в качестве источника используют ламповые преобразователи, обладающими рядом недостатков. Новое поколение полупроводниковых ключей на основе SiC и GaN позволяет использовать преобразователи для формирования напряжения высокой частоты до нескольких мегагерц в установках индукционного нагрева. Это позволяет улучшить массогабаритных показателей устройства, повысить КПД и точность управления температурой нагрева. Кроме применения новых полупроводниковых ключей остаются актуальным развитие технологий по снижению коммутационных потерь, позволяющих расширить диапазон применения по частоте и мощности. В данной работе предлагается использование высокочастотного резонансного инвертора с мягкой коммутацией транзисторов. Это позволяет переключать ключи при нулевом напряжении или токе, что практически полностью нивелирует коммутационные потери, снижает нагрузку на полупроводники и обеспечивает синусоидальную форму тока, минимизируя негативное влияние на электромагнитную совместимость системы. Для компенсации реактивной мощности нагрузки и обеспечения резонансного режима работы используется колебательный контур, состоящий из индуктора и компенсирующей емкости. В рамках реализации предлагаемого решения разрабатывается эскиз макета инвертора на базе SiC-MOSFET транзисторов. Система управления макетом строится на микроконтроллере с использованием алгоритмов фазовой автоподстройки частоты, что необходимо для автоматического удержания резонансного режима при изменении характеристик нагреваемого объекта. Проведенные расчеты позволяют сделать предварительный вывод о том, что сочетание SiC полупроводников с резонансной топологией обеспечит высокий КПД преобразователя. Разработана модель высокочастотного инвертора, позволяющая подтвердить расчеты и перейти к разработке эскиза макета, что позволит подтвердить эффективность выбранных алгоритмов управления в реальных условиях и способность силовых ключей продолжительное время работать на высоких частотах.

Литература

1. **O. Lucía, P. Maussion, E.J. Dede and J.M. Burdío**, “Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509–2520, May 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.

*Д.А. Ромашкин, аспирант;
рук. Е.В. Конюшенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СИНХРОННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С ИНТЕГРИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДЛЯ СУДОВОГО ТРАНСПОРТА

В настоящее время исследования в области высокоэффективного электрического транспорта становятся всё более актуальными. Гибридные электрические суда имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными судами, работающими на топливе, такие как лучшие характеристики при низких скоростях и большая гибкость при распределении мощности между двигателями.

Электрические машины с интегрированной магнитной передачей обладают большей плотностью момента по сравнению с обычной магнитной передачей. Главным недостатком существующих конструкций является расположение постоянных магнитов на поверхности ротора. Они подвержены отлету и размагничиванию, так же данная конструкция имеет значительную пульсацию момента [1].

Для преодоления вышеперечисленных проблем рассматривается конструкция с V-образным расположением постоянных магнитов внутри ротора, что позволяет увеличить механическую прочность ротора, защитить магниты от повреждения и концентрировать магнитный поток для повышения выходного крутящего момента, а также снизить пульсации момента. В работе представлены результаты аналитического обзора электрических машин с концентрацией магнитного потока и электрических машин с интегрированной магнитной передачей.

Литература

1. **Zhao H. et al.** Design and optimization of a magnetic-geared direct-drive machine with V-shaped permanent magnets for ship propulsion // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2021. — Т. 8. — №. 2. — С. 1619–1633.

М.К. Гуляев, студ.; рук. В.В. Рыжов, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Развитие водородной энергетики требует создания эффективных и безопасных систем транспортировки и хранения жидкого водорода (LH₂). Ключевой характеристикой, определяющей эксплуатационные качества криогенных цистерн, является качество тепловой изоляции, которое напрямую влияет на скорость испарения продукта и, следовательно, на время его бездренажного хранения. Тепловые потери через сложные многослойные конструкции изоляции описываются интегральным параметром — эквивалентным коэффициентом теплопроводности (Лэкв). Точное определение Лэкв является критически важным как на этапе проектирования, так и для прогнозирования реального поведения емкости.

Для быстрого и точного определения данного параметра предлагается использование модели ячейки изоляции, разработанной в программном обеспечении Comsol Multiphysics [1]. В зависимости от заданной геометрии и выбранных материалов изоляции можно получить значение эквивалентного коэффициента теплопроводности, который впоследствии целесообразно использовать, например, для создания полноценной трёхмерной модели для расчёта времени бездренажного хранения криотоплива.

При создании математической модели в качестве граничных условий был задан тепловой поток, добавление которого привело к изменению температуры ячейки на 1K по трём осям [2].

Для определения коэффициента теплопроводности были созданы модели ячеек и произведены расчеты для разных типов изоляции — вакуумной, целлюлозно-порошковой, аэрогелевой и т.д.

Литература

1. COMSOL Multiphysics® v. 6.2., www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
2. Цыганков А.С., Голубенков А.С. Теплофизические свойства и теплозащитные характеристики высокоэффективных изоляционных конструкций криогенных систем // Холодильная техника. — 2020. — № 8. — С. 32–38. (Статья посвящена непосредственно анализу эффективности изоляции в криогенных системах).

В.Н. Круглов, асп.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО КОМПЕНСАТОРА

Асинхронизированная машина — это электрическая машина с возбуждением, сконструированная так, что положение вектора магнитного потока не зависит от пространственного положения ротора. Это получается за счет наличия на роторе нескольких обмоток возбуждения. Классическая обмотка возбуждения и дополнительная обмотка управляющая.

В ходе работы было принято решение использовать полученную модель для моделирования в ней реально существующего турбогенератора ТЗФАУ-160. Данная электрическая машина является неявнополюсной машиной с системой двойного питания с классической обмоткой возбуждения и дополнительной.

Разработка математической модели выполнялась в программном комплексе COMSOL Multiphysics (рис. 1).

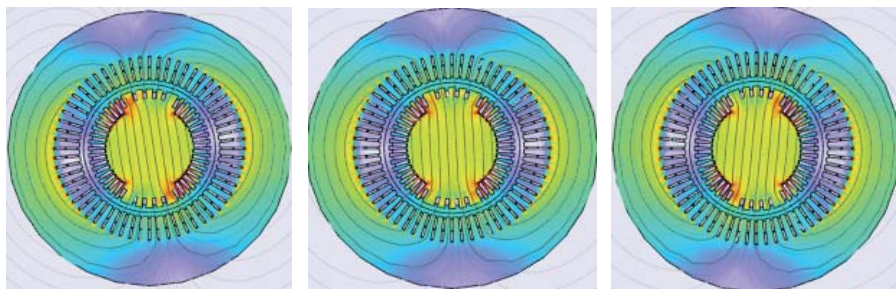


Рис. 1. Модель асинхронизированного компенсатора в COMSOL Multiphysics

На рисунке 1 показано распределение магнитного поля в режиме холостого хода при изменении тока в катушке управления. Магнитное поле смещается за счет изменения тока в катушке управления, что позволяет обеспечить устойчивую работу при любом угле нагрузки. Данная тенденция сохраняется и при нагрузке.

В данной работе приводится разработка математической модели. А также делается сравнение эффективности асинхронизированных компенсаторов при различных параметрах.

Литература

1. **Y. Shakaryan, P. Sokur, N. Pinchuk.** “Experience in the creation and application of asynchronous generators and compensators in the Russian Federation” in Proc 12th Int. Conf. on WETC — Electrical engineering, 2012.

С.М. Иванов, студ.; рук. П.А. Дергачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

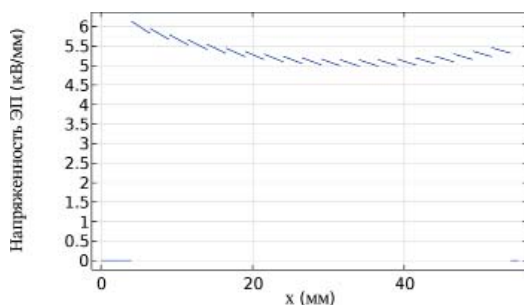


Рис. 1. Оптимальный график распределения напряженности электрического поля

ность и надежность энергосистемы [1].

В программе COMSOL Multiphysics создана модель для оптимизации количества обкладок ввода в соответствии с заданными требованиями. Моделирование включает электростатический расчет.

Моделирование показало, что отсутствие обкладок приводит к неравномерному распределению напряженности электрического поля. Наличие обкладок позволяет перераспределить поле и снизить его значения. Наиболее равномерное распределение поля наблюдается при использовании 21 обкладки. Дальнейшее увеличение числа обкладок не приводит к улучшению характеристик поля.

Литература

1. Henny I. Septyani, Indera Arifianto, Andreas P. Purnomoadi High Voltage Transformer Bushing Problems, 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 17–19 July 2011, Bandung, Indonesia.

Высоковольтные вводы играют ключевую роль в энергетических системах, обеспечивая электрическое соединение между первичной обмоткой трансформатора и внешними сетями. Комплексный подход к изучению и моделированию высоковольтных вводов способствует оптимизации конструкции, что в конечном итоге повышает эффективность

*Д.Р. Еркналиев, аспирант;
рук. Е.А. Кузнецова, к.н.т., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА НЕСИММЕТРИИ НА БАЗЕ УШРТ

Цель исследования состоит в разработке и исследовании регулятора несимметрии для повышения эффективности электросетевого комплекса. Проблема симметрирования электроэнергии (несимметрии напряжений в системах электроснабжения) заключается в необходимости устранения перекоса фаз, который возникает из-за неравномерного распределения нагрузки между фазами. Это приводит к дополнительным потерям мощности и энергии, а также к потерям напряжения в сети. Несимметрия влияет на работу всех потребителей электроэнергии, например на железнодорожные объекты Восточного полигона. Разработанный регулятор будет реализовывать алгоритм управления тиристорными вентилями для оптимального распределения нагрузок по фазам, что позволит сократить потери и приведет к значительной экономии электроэнергии.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) Разработка алгоритма управления тиристорными вентилями [1];
- 2) Разработка математической модели для анализа возможности несимметричного управления в высоковольтных сетях [2];
- 3) Исследование регулятора на подстанции с установленным УШРТ на основе полученных данных.

По результатам работы был разработан регулятор несимметрии и алгоритм несимметричного управления и построена математическая модель на платформе «Open modelica».

Для разработанной модели был синтезирован алгоритм управления тиристорных вентилей на базе УШРТ с целью получения симметричной высоковольтной электросети. Разработанный регулятор позволит снизить потери в высоковольтных линиях на 15–25%.

Литература

1. **Матинян А.М.** Быстродействующие управляемые шунтирующие реакторы для применения в ЕНЭС России и за рубежом / А.М. Матинян, М.В. Пешков, В.Н. Карпов, Н.А. Алексеев, В.А. Падалко, А.В. Антонов, П.Ю. Булыкин // Энергия единой сети. 2017. № 3.
2. **Чуприков В.С.** Концепции применения статических тиристорных компенсаторов в электрических сетях сверхвысокого напряжения // «Энергоэксперт», № 5, 2014 г.

А.Е. Чичков, асп.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО Н-МОСТОВОГО ИНВЕРТОРА НА GaN ТРАНЗИСТОРАХ В СКОЛЬЗЯЩЕМ РЕЖИМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА

Высокое преимущество для сетевого регулятора на базе Н-мостового многоуровневого инвертора достигается за счет применения GaN-транзисторов и алгоритма скользящего режима управления (СМУ). GaN-транзисторы обладают высоким быстродействием, способны коммутироваться с частотами в сотни килогерц и мегагерц, что на порядок выше возможностей традиционных кремниевых IGBT. При этом GaN-транзисторы имеют относительно низкое номинальное напряжение, поэтому их применение становится особенно эффективным именно в каскадных Н-мостах. Такое сочетание обеспечивает компактность и модульность конструкции.

Алгоритм СМУ отличается исключительной робастностью и быстродействием, поскольку в реальном времени принудительно удерживает систему на заданной траектории, мгновенно реагируя на любые отклонения и возмущения. Для сетевого регулятора это позволяет с высокой точностью и скоростью реагировать на изменения нагрузки, компенсировать гармоники и регулировать мощность. Использование высокой частоты переключения GaN-транзисторов минимизирует характерное для СМУ высокочастотное колебание, обеспечивая плавное и точное управление.

Также преимуществом применения высокочастотных GaN-транзисторов с СМУ является уменьшение габаритов пассивных компонентов, в частности дросселя индуктивности выходного фильтра сетевого регулятора.

В данной работе рассчитаны параметры и разработана модель сетевого регулятора с учетом характеристик GaN-транзисторов, работающего в скользящем режиме. По результатам моделирования можно сделать вывод, что такие системы позволяют создавать малогабаритные, эффективные сетевые регуляторы, в том числе для применения в умных сетях (Smart Grid).

Литература

1. **Al Hadi A. et al.** Hardware evaluation for GaN-based single-phase five-level inverter // IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 64248–64259.
2. **He T. et al.** Model predictive sliding control for cascaded H-bridge multilevel converters with dynamic current reference tracking // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. — 2021. — Т. 10. — №. 2. — С. 1409–1421.

*П.В. Сплендер, студент;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ВИБРОМЕТРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа электрооборудования станций и подстанций сопровождается возникновением вибраций, связанных с износом подшипников вращающихся узлов. Диагностика вибраций позволяет предотвратить аварии энергетического оборудования. С этой целью предлагается использовать магнитожидкостные виброметры (МЖВ). Конструктивно любой виброметр состоит из магнитного подвеса с чувствительным элементом в виде кольцевого постоянного магнита и измерительных обмоток [1].

Целью исследований является определение значений магнитной индукции в радиальных сечениях магнитного подвеса МЖВ, что необходимо для расчета силы взаимодействия постоянных магнитов в виброметре. На основании полученных результатов выбираются рациональные размеры и характеристики материалов магнитов, проводится оценка электромагнитной совместимости виброметра с электронными устройствами, расположенными вблизи него. Для моделирования магнитного поля используется программная среда QUICK FIELD с заданными граничными условиями Дирихле — Неймана. Число элементов в моделях составляло 158000–159000.

Исследовались магнитожидкостные виброметры с «закритическими» магнитами с размерами $K20 \times 12 \times 5$; $K15 \times 10 \times 4$; $K10 \times 7 \times 3$; $K5 \times 3 \times 2$ и величиной коэрцитивной силы 540 кА/м, 716 кА/м, 800 кА/м [2]. В ходе моделирования расстояние между магнитами варьировалось от значения высоты магнитов в направлении намагничивания до значения их наружного диаметра. При этом средняя магнитная индукция изменялась в 10–12 раз в зависимости от размеров и характеристик постоянных магнитов.

Полученные результаты позволяют прогнозировать параметры магнитного подвеса МЖВ на этапе их проектирования.

Литература

1. Сплендер П.В., Сайкин М.С. Конструктивные пути совершенствования магнито-жидкостных датчиков вибраций. Сборник научных трудов 21-ой Всероссийской с международным участием Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, Россия, Иваново, 2024 г., С. 191–198 (сентябрь 2024 г.).
2. Лагуткина Д.Ю., Сайкин М.С. Современные магнитные материалы в электротехнике. Учебное пособие. / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». — Иваново, 2018. — 104 с.

Е.С. Суранова, асп.;
рук. Е.А. Кузнецова, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ В СОСТАВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Ключевым этапом предиктивного технического обслуживания (ПТО) для низковольтных комплектных устройств (НКУ) является прогнозирование состояния оборудования на основе данных, полученных с датчиков. Для разработки точной и надежной прогнозной модели был проведен сравнительный анализ нескольких предиктивных алгоритмов:

- Ансамбли на основе деревьев: градиентный бустинг (Gradient Boosting), случайный лес (Random Forest) [1];
- Рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) [2];
- Методы опорных векторов (SVM) [3];
- Регрессор (Regressor) [4].

На основе тестовой выборки данных для каждого из перечисленных выше алгоритмов была рассчитана средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) при прогнозировании отказа оборудования (механический выход из строя, нарушение нормального режима работы и т.д.), значения которой находятся в диапазоне 7,9–8,5%, лучший результат показал алгоритм на основе деревьев. В рамках проектирования ПТО предполагается снизить MAPE до значений ниже 5%, так как ошибка прогноза ниже этого порога обеспечивает экономически оправданное планирование технического обслуживания. Для снижения MAPE до требуемой величины необходимо улучшить качество данных: бороться с шумами и случайными выбросами, увеличить объем обучающей выборки.

Литература

1. **Saleptsis M., Mussetta M., Leva S.** “Gradient Boosting Algorithms for Day-ahead Residential Load Forecasting of Individual Household” in Proc. 2025 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP).
2. **Anaraki R., Palaniappan R., Hager U., Rehtanz C.** “Anomaly Detection in Low-Voltage Grids with LSTM Autoencoders: A Study on Future Scenario Impacts” in Proc. 2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE).
3. **Zhou J., Wang Z., Chen C., Peng W.** “Automatic Classification Method of Fault Data in Low Voltage Distribution Network Based on SVM” in Proc. 2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA).
4. **Ridwan, Suryoatmojo H., Suwito** “Predictive Maintenance of Water Injection Motor Using Multiple Regression Analysis” in Proc. 2025 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA).

А.А. Засалкин, студ.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СЕТЕВЫМ РУГУЛЯТОРОМ

При питании потребителей электрической энергией часто возникает проблема со стабилизацией напряжения [1]. Спрос на качество напряжения постоянно возрастает и становится важным для современных и будущих технологий. Традиционными способами стабилизации напряжения в электрической сети является конденсаторные блоки, обеспечивающих регулирование уровня напряжения за счёт генерирования реактивной мощности, схемы на тиристорно-реакторных группах, схемы с последовательно подключенными трансформаторами.

Современными способами являются решения, основанные на преобразователях на полностью управляемых ключах. Среди них STATCOM, который подключается параллельно к сети, а также DSTATCOM и DVR, которые подключаются последовательно в сеть.

В настоящей работе рассматривается и оценивается потенциал применения параллельного сетевого регулятора (STATCOM). Разработана упрощённая модель, которая включает в себя: трехфазный источник электроэнергии, сопротивления сети R-L, позволяющие задать параметры сети, нагрузка и сетевой регулятор (рисунок 1). В модели определен диапазон регулирования напряжения, а также получены характеристики для расширения диапазона регулирования за счет введения дополнительных дросселей в сеть.

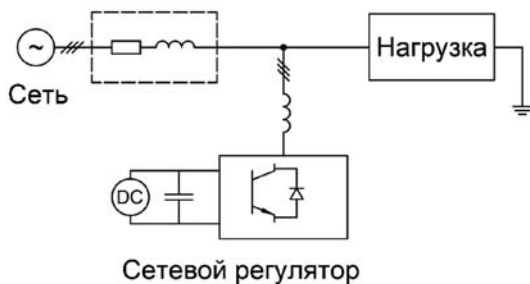


Рис. 1. Эквивалентная схема регулятора напряжения

Литература

1. Анбарасан А. «Повышение стабильности напряжения в энергосистеме с помощью STATCOM» // Международный журнал инженерных наук и технологий (IJEST), 2012.

И.П. Шорсткин, асп.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В современном мире, где технологии и энергия играют ключевую роль, применение автономных генераторов стало актуальной задачей. Эти устройства дают возможность получать электрическую энергию в местах, где доступ к централизованной электрической сети затруднен или отсутствует, а также в случаях аварий и перебоев в электроснабжении.

В ветроэнергетике для автономных систем мощностью от 10 до 100 кВт особый интерес представляет асинхронный генератор (АГ) с короткозамкнутым ротором, т.к. он обладает следующими преимуществами: надежность, дешевизна, простота в обслуживании, способность вырабатывать энергию при переменной скорости вращения ротора [1, 2]. Однако частота и амплитуда выходного напряжения АГ зависят от величины и характера нагрузки, что усложняет его применение в автономных системах.

С целью определения влияния активной и реактивной мощности нагрузки АГ разработана модель системы АГ с ветротурбиной, системой возбуждения АГ и нагрузкой. Задание активной и реактивной мощности осуществляется при помощи источников тока. Получены характеристики, показывающие влияние активной и реактивной мощности на частоту и амплитуду напряжения АГ.

По результатам моделирования установлено, что изменение активной мощности приводит к изменению частоты напряжения на клеммах АГ, а изменение реактивной мощности приводит к изменению амплитуды напряжения. Полученные результаты позволяют оценить рабочие режимы АГ при изменении активной и реактивной мощности.

Литература

1. **Zuher Alnasir, Mehrdad Kazerani** "An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint" in Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 28, pp. 597–615, December 2013.
2. **T. Shanker and R.K. Singh** "Wind energy conversion system: A review," 2012 Students Conference on Engineering and Systems, Allahabad, India, 2012, pp. 1–6.

Секция 26
ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА
Electric drive and automation

Председатель секции: д.т.н., профессор Анучин Алексей Сергеевич

Секретарь секции: к.т.н. Благодаров Дмитрий Анатольевич

Н.В. Горелов, студ.;
рук. А.Н. Ладыгин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Доклад посвящен созданию лабораторного практикума для изучения особенностей применения частотно-регулируемого электропривода подъемно-транспортных установок. Технической базой для лабораторного практикума послужил лабораторный макет подъемной лебедки с автоматизированным асинхронным электроприводом, в состав которого входит преобразователь частоты (ПЧ) крановой серии STV900H. Актуальность работы предопределяется тенденцией широкого применения ПЧ, обладающих продвинутым набором прикладных функций, специально ориентированных на применение в приводе подъемных установок, например, управление электромагнитным тормозом, автоматический выбор повышенной скорости подъема и др.. Подобная тенденция делает необходимым использование соответствующих лабораторных практикумов при подготовке специалистов.

В докладе представлены результаты разработки методики проведения практикума и требований к лабораторному стенду. Разработка основана на опыте реализации практикума по курсу Электрический привод на кафедре Автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ» [1] с использованием глубокого анализа особенностей прикладных функций ПЧ STV900H [2]. Результаты этого анализа позволили сформулировать конкретные лабораторные задания практикума. Натурный стенд, отвечающий разработанным требованиям, и позволяющий реализовать предлагаемые задания практикума, был реализован в лаборатории НОЦ «Систэм Электрик — МЭИ». В докладе представлены результаты практического тестирования разработанного практикума.

Литература

1. Оборудование и применение лабораторного практикума по электрическому приводу: учеб.-метод. пособие / А.Н. Ладыгин, Ю.Н. Сергиевский, Д.Д. Богаченко и др. — М.: Издательство МЭИ, 2022. — 52 с.
2. Руководство по эксплуатации. Преобразователи частоты для кранов серии STV900H / АО «Систэм Электрик». — Электрон. дан. — [Б. м.], 2024. — URL:<https://systeme.ru/download/rukovodstvo-po-ekspluatacii-stv900h?ysclid=mhjd284rtu117358861> (дата обращения: 03.11.2024).

Г.С. Ефремов, студ.;
рук. Н.М. Кураев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

АНАЛИЗ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЭВАКУАЦИИ ПассажиРОВ ЛИФТА

С ростом числа этажей в зданиях лифт становится критически важным элементом инфраструктуры. Внезапное отключение напряжения может привести к остановке лифта между этажами, что создает угрозу безопасности и комфорту пассажиров (паника, травмы, долгое ожидание спасателей). Ручные методы эвакуации сложны, длительны и не всегда безопасны. Автоматизация процессов эвакуации пассажиров лифтов является ключевым требованием для современных систем безопасности [1].

Представляет интерес рассмотреть несколько способов перемещения кабины при автоматической эвакуации после ее остановки между этажами из-за отключения питающего напряжения: использование внешнего накопителя энергии для управления главным приводом лифта, включая работу двигателя от преобразователя частоты, при динамическом торможении и управление электромагнитным тормозом.

Использование динамического торможения двигателя или управления электромагнитным тормозом позволит переместить кабину лифта в сторону неуравновешенного груза до ближайшего этажа.

В данной работе проводится сравнительный анализ предложенных способов автоматической эвакуации для выявления их основных преимуществ и недостатков. Во всех случаях рассматривается лифт с безредукторным частотно-регулируемым электроприводом с синхронным двигателем с постоянными магнитами.

Литература

1. Г.Г. Архангельский, Н.И. Балабанов, Л.В. Гуцин, А.А. Ионов, А.А. Рожков, М.А. Степанов, В.Я. Ткаченко. «Лифты, платформы подъемные для инвалидов, эскалаторы». Ч. 1. Лифты; под общ. ред. Л.В. Гуцина. — М.: Изд-во АСВ, 2022. — 680 с.

О.А. Пунников, студ.; рук. Л.Н. Рассудов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Статическая несбалансированность вращающихся масс может приводить к увеличению нагрузки на узлы электропривода, если ось вращения расположена не вертикально. Для решения проблемы часто используются дополнительные балансировочные грузы. В случае изменяющегося дисбаланса процедура его определения и размещения грузов на кронштейнах часто выполняется вручную [1].

Настоящая работа посвящена вопросам балансировки барабана гантри с горизонтальной осью вращения. Разработанная программа ЭВМ [2] позволяет использовать информацию о нагрузке сервопривода вращения гантри для указания персоналу, на каком кронштейне груз какой массы необходимо расположить. Дисбаланс определяется путём обработки зависимости момента, развиваемого сервоприводом, от угла поворота механизма [3]. Дополнительно рассматривается случай, когда в ходе работы дисбаланс может изменяться по технологическим причинам в следствие перемещения масс на самом вращающемся теле. Главная цель такой балансировки — снизить величину несбалансированности во всем диапазоне подвижных масс. Результаты работы позволили упростить балансировку отечественных томографов, которая прежде осуществлялась вручную. Новые возможности балансировки позволяют уменьшить установленную мощность сервоприводов [4], снизить энергопотребление, уменьшить износ механических передач и повысить точность воспроизведения задаваемых перемещений механизмов с горизонтальной осью вращения.

Литература

1. **Байбородов Ю.И.** Балансировка вращающихся масс ротора: методические указания / Ю.И. Байбородов, В.П. Тукмаков, Б.Б. Косенок. — Самара : Изд-во Самарского гос. аэрокосм. ун-та, 2012. — 16 с.
2. **Рассудов Л.Н.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662415 Российская Федерация. Программа «Статическая балансировка электроприводных механизмов с горизонтальной осью вращения»: заявл. 22.04.2025: опубл. 20.05.2025 / Л.Н. Рассудов, О.А. Пунников, Д.А. Осипов; заявитель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». — EDN GTNBHC.
3. **Рассудов Л.Н.** Калиброванное управление силой вентильного двигателя / Рассудов Л.Н., Балковой А.П., Сливинская Г.А., Капитонец В.К., Морозова Т.Н., Иноземцев Г.И. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Том 2, № 2 С. 3–6.
4. **Рассудов Л.Н.** Учет аппаратных ограничений при построении систем управления сервопривода / Л.Н. Рассудов // Электричество. — 2020. — № 7. — С. 57–64. — DOI 10.24160/0013-5380-2020-7-57-64. — EDN DDWHIM.

В.В. Леушин, студ.; рук. Л.Н. Рассудов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ «СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ»

В электроприводных механизмах с горизонтальной осью вращения рабочего органа статический дисбаланс вращающихся масс повышает нагрузку на узлы электропривода. Он приводит к завышению мощности электропривода, повышенному энергопотреблению, износу механики и снижению точности отработки требуемых перемещений. В отечественных медицинских изделиях для томографии и лучевой терапии балансировка выполняется вручную, что позволяет добиться удовлетворительного результата при отсутствии изменяющегося дисбаланса барабана гантри.

Для автоматизированной балансировки таких систем существует программа «Статическая балансировка электроприводных механизмов с горизонтальной осью вращения» [1], которая является инструментом для анализа координат сервопривода при его вращении на постоянной скорости [2]. Она позволяет учитывать переменный дисбаланс и оптимизировать распределение масс балансировочных грузов по предустановленным кронштейнам. Настоящая работа посвящена разработке экспериментального стенда, позволяющего провести тестирование всего функционала этой программы. Рассматриваются вопросы выбора кинематической схемы экспериментального стенда, его конструктив, способы имитации переменного статического дисбаланса, определение масс грузов, механизмов их крепления, а также вопросы настройки сервопривода [3]. По результатам исследований была проверена работоспособность программы и сформулированы рекомендации к сервоприводу для повышения эффективности процедуры балансировки.

Литература

1. **Рассудов Л.Н.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662415 Российская Федерация. Программа «Статическая балансировка электроприводных механизмов с горизонтальной осью вращения»: заявл. 22.04.2025; опубл. 20.05.2025 / Л.Н. Рассудов, О.А. Пунников, Д.А. Осипов; заявитель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». — EDN GTNBHC.
2. **Рассудов Л.Н.** Калиброванное управление силой вентильного двигателя / Рассудов Л.Н., Балковой А.П., Сливинская Г.А., Капитонец В.К., Морозова Т.Н., Иноземцев Г.И. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Том 2, № 2 С. 3–6.
3. **HIWIN** user manual MD09UE01-2112_V2.2 [Электрон. ресурс] URL: <https://device.report/manual/4495308>.

Э. Аслан, студ.;

рук. Л.Н. Рассудов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ПРЕДЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В МИКРОШАГОВОМ РЕЖИМЕ

Не смотря на все более широкое распространение для задач позиционирования электроприводов с синхронными и гибридными шаговыми электрическими машинами, работающими в вентильном режиме, шаговый и микрошаговый режимы всё еще находят применение [1]. В основном это касается систем, в меньшей степени требовательных к точности и динамике. Кроме того, микрошаговый режим широко используется при решении специфических задач инициализации и фазировки электроприводов — перед переходом в вентильный режим. Известно, что микрошаговый режим не позволяет раскрыть все возможности электрической машины [2]. Предельные механические характеристики в шаговом режиме существенно отличаются от характеристик вентильного режима, а эффекты насыщения дополнительно существенно искажают их. Поэтому на основании паспортных данных широкого круга производителей электрических машин бывает сложно судить даже о скорости холостого хода в зависимости от амплитуды задания тока, что существенно затрудняет проектирование электроприводных систем и систем управления ими [3].

Настоящая работа посвящена разработке и экспериментальному подтверждению методики, в соответствии с которой на основании симуляционной модели электромагнитной системы, рассчитываемой с использованием метода конечных элементов, можно получить достаточно точные параметры математической модели для построения предельных механических характеристик электроприводов в микрошаговом режиме.

Полученный результат предлагается использовать для составления более подробной технической документации на электрические машины, в первую очередь — гибридные шаговые. Это позволит предоставить проектировщикам электроприводных систем больше информации для принятия взвешенного решения о выборе компонентов электропривода.

Литература

1. Балковой, А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. — Москва : Издательский дом «МЭИ», 2010. — 328 с. — ISBN 978-5-383-00457-9. — EDN QXSHYA.
2. Carfagna E. Performance Comparison Between Microstepping and Field-Oriented Control for Hybrid Stepper Motors / Carfagna E., Migliazza G., Medici M., Lorenzani E. // *Energies*, 2025, 18(3): 553. DOI: 10.3390/en18030553.
3. Рассудов, Л.Н. Учет аппаратных ограничений при построении систем управления сервопривода / Л.Н. Рассудов // *Электричество*. — 2020. — № 7. — С. 57–64. — DOI 10.24160/0013-5380-2020-7-57-64. — EDN DDWHIM.

*С. Болюкбаши, студ.;
рук. Л.Н. Рассудов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Умение произвести настройку электропривода с целью оптимизации его характеристик под требования конкретного промышленного объекта является критически важным для профильных специалистов. Формирование соответствующих навыков традиционно осуществляется в ходе лабораторных работ — в ходе очных занятий под контролем преподавателя.

Опыт использования в НИУ «МЭИ» виртуальных лабораторных стендов с круглосуточным доступом [1] показал их эффективность для самостоятельной работы обучающихся и в качестве дополнения к очным занятиям, и в качестве единственного средства обучения — при отсутствии возможности проведения очных занятий из-за эпидемиологических или других причин. В отличие от реальных стендов в виртуальном тренажере возможен более широкий спектр проводимых экспериментов, ведь нет ограничений по характеристикам, количеству и разнообразию оборудования, подлежащего исследованию. Нет и ограничений, связанных с требованиями по обеспечению физической защиты обучающихся от нештатных ситуаций, возникающих при работе с реальным оборудованием.

Настоящая работа направлена на расширение виртуальной лабораторной базы кафедры Автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ». Она посвящена созданию виртуального стенда исследования и настройки электропривода с асинхронной электрической машиной и скалярной системой управления, который находит очень широкое применение на промышленных объектах. При разработке виртуального стенда акцент был сделан как на стационарных режимах работы электропривода, так и на переходных процессах. Экспериментально подтверждено, что результаты симуляции в реальном времени, получаемые на базе виртуального стенда, соответствуют работе реального оборудования.

Внедрение в учебный процесс разработанного виртуального лабораторного стенда должно позволить выпускникам с большей уверенностью брать на себя задачи, связанные с оптимизацией режимов работы электроприводов промышленных объектов при переходных процессах.

Литература

1. **Рассудов Л.Н.** Открытая виртуальная учебная лаборатория исследования электрического привода / Л.Н. Рассудов, А.А. Корунец // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. — 2024. — № 1. — С. 21–27. — DOI 10.24160/1993-6982-2024-1-21-27. — EDN RTYZFN.

Д.А. Осипов, асп.; рук. Л.Н. Рассудов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АЛГОРИТМЫ КАЛИБРОВКИ И ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАФОВ И КОМПЛЕКСОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Нехватка компьютерных томографов и комплексов лучевой терапии [1], а также геополитические риски предопределили необходимость разработки и обеспечения серийного производства отечественных медицинских изделий этих типов. В состав рассматриваемых изделий, во-первых, входит электроприводной механизм вращения — барабан гантри. На гантри располагается диагностическое и/или терапевтическое оборудование. Во-вторых, могут быть предусмотрены электроприводные механизмы перемещения компонентов этого оборудования на гантри: источников, фильтров и приемников излучения. Для каждой из этих электроприводных подсистем необходимо разработать алгоритмы процедур калибровки и инициализации с высокой степенью унификации.

Калибровка производится на этапе пуско-наладки оборудования. В ходе нее осуществляется позиционирование электроприводов в характерные точки и фиксируются показания систем измерения положения, которых в связи с требованиями безопасности обычно бывает несколько. Инициализация электроприводных систем должна производиться при включении медицинской установки, а также в случае необходимости очередной проверки корректности работы систем движения, например, перед проведением ответственной процедуры лучевой терапии [2]. В ходе инициализации производится проверка корректности работы электроприводов и соответствие показаний, полученным при проведении процедуры калибровки.

В работе рассмотрены особенности построения алгоритмов калибровки и инициализации и требования к составу датчиков положения каждой из электроприводных подсистем в составе мобильного конусно-лучевого компьютерного томографа (КЛКТ) — разработки компании Росатом [3].

Литература

1. **Хмелевский Е.В., Каприн А.Д.** Состояние радиотерапевтической службы России: сравнительный анализ и перспективы развития. — Онкология. Журнал им. П.А. Герцена, 2017, т. 6, вып. 4, с. 38–41; doi: 10.17116/onkolog20176438-41
2. **Varian Medical Systems, Inc.** Homing and establishing reference frames for motion axes in radiation systems. Patent No.: US8692503B2. Date of Patent: Apr. 8, 2014.
3. **Медиацентр** атомной промышленности. Разработки «Росатома» стали победителями национальной премии «Лучший промышленный дизайн России» [Электрон. ресурс] <https://atommedia.online/press-releases/razrabotki-rosatoma-stali-pobeditel/> (дата обращения 01.08.2025).

С.В. Савельев, студ.;

рук. Д.И. Савкин, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ПРИВОДОМ С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

Современные сервосистемы требуют высокодинамичного позиционирования с ограничениями по скорости, ускорению и рывку при минимальной задержке и упрощённой настройке контуров, что стимулирует переход от классического подчинённого регулирования к программному предуправлению траектории. Цель работы — вывести компактные дискретные уравнения для генератора траектории и программно-задаваемого момента, описать универсальные алгоритмы S-сглаженных профилей и предложить пользовательскую модель задания перемещения в естественных единицах с пересчётом в относительные координаты. А также проработать быстродействующий цифровой интерфейс на базе современных решений в области передачи данных.

Исходное уравнение движения с учетом электромагнитного момента и вязкого трения было переписано в относительных величинах и дискретизировано по периоду ШИМ, что даёт базу для реального времени без громоздкого планировщика интервалов. Выведены безразмерные базисы для инерции и трения, а также уравнение программно-задаваемого момента с использованием производных требуемых координат в дискретной форме.

Получено уравнение формирования момента, связывающее требуемые скорость и ускорение с учётом нормированных инерционных и вязких параметров, что позволяет вычислять момент предупреждающе и разгружать контуры обратной связи. Такой подход сокращает роль ошибок регулирования до малых коррекций и повышает быстродействие системы в сравнении с классической структурой подчинённого регулирования.

Предложена структура подчинённого регулирования, объединённая с предуправлением: внутренние контуры тока/скорости/положения работают по отклонению, а программный модуль заранее формирует момент и эталонную траекторию. Система поддерживает ВЭП и ШЭП, энкодер и датчики Холла, режимы непрерывных заданий и пакетных кадров с ограничениями, обмен заданиями по CAN и выбор пользовательских размерностей.

Подготовлены рекомендации по использованию интерфейса Ethernet в качестве основного интерфейса верхнего уровня.

В.А. Гармашова, студ.;
рук. А.С. Анучин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТА И МОЩНОСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМАХ

Современные электроприводы на основе вентильно-индукторных двигателей (ВИД) перспективны благодаря своей надежности, низкой стоимости и высокой эффективности. Однако широкому распространению ВИД препятствуют значительные пульсации момента и сложность управления, особенно в генераторном режиме и в зоне высоких скоростей. Важной задачей является оценка максимального момента и мощности во всем диапазоне скоростей для корректного проектирования систем управления. Существующие методы часто не учитывают ограничения силового инвертора по напряжению и току, что приводит к завышенным оценкам производительности.

В ходе исследований на кафедре АЭП НИУ «МЭИ» был разработан итерационный численный метод, позволяющий определять теоретический максимум момента и мощности ВИД как в двигательном, так и в генераторном режимах с учетом ограничений инвертора. Метод предполагает оптимизацию подбора углов коммутации фаз, а на высоких скоростях и начального потокосцепления для плавного перехода в режим ослабления поля.

Личный вклад автора заключался в проведении имитационных экспериментов и анализе характеристик ВИД. На основе оптимальных параметров управления были получены механические характеристики, временные диаграммы токов и напряжений для различных скоростей, а также годографы потокосцепления, подтвердившие эффективность алгоритма оптимизации.

Полученные результаты позволяют точно оценить предельные возможности ВИД. Оптимизация коммутационных углов позволила увеличить выходную мощность на 8% по сравнению с известными методами. Перспективным направлением является интеграция метода в системы автоматизированного проектирования для создания оптимизированных инверторов с учетом тепловых режимов силовых модулей.

Литература

1. **Lawrenson, P.** Switched-reluctance motor drives. Electronics and Power, vol. 29, no. 2, pp. 144–147, February 1983, doi: 10.1049/ep.1983.0071
2. **Krishnan, R.** Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. CRC Press, 2017 — 432p. ISBN 978-0-8493-0838-3

*А.Д. Коротков, студ.;
рук. Д.А. Благодаров, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ», Москва)*

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Уже долгое время на грузоподъёмных кранах растут количество аварий и риски получить травму. Некоторые аварии обусловлены отказами систем безопасности и электрооборудования, поэтому этой проблеме уделяется большое внимание. Актуальным решением является применение внешних устройств для мониторинга и контроля ключевых параметров, например модуля сбора данных МСД-200 от компании ОВЕН [1].

Этот модуль может быть использован в системах сбора данных в различных областях промышленности, а также для использования в системах автоматического управления для анализа качества работы системы, как на этапе пуско-наладочных работ, так и в процессе эксплуатации.

Комплексно вся система мониторинга реализует такие функции как: сбор данных в удаленных модулях, установленных в шкафах управления и на самих объектах; передачу данных разными способами, обработку данных на диспетчерском сервере с целью предоставления результатов мониторинга по запросу, расписанию; поддержку доступа к данным с мобильных средств связи.

На основе проведенного исследования на имеющемся на кафедре Автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ» стенде фирмы ОВЕН с подключенным ПК, преобразователем частоты, асинхронным двигателем, модулем ввода и программируемым логическим контроллером для связи с МСД-200, были получены в реальном времени параметры системы ПЧ-АД при отработке циклограммы, а именно: частота, ток, напряжение звена постоянного тока ПЧ и температура радиатора. Сделан вывод, что модуль сбора данных перспективен и хорошо подходит для поставленных задач мониторинга, его можно использовать для кранового оборудования в удалённых локациях.

Литература

1. Руководство по эксплуатации МСД-200 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://owen.ru/downloads/re_msd-200.pdf (дата обращения: 20.10.2025)

*Н.А. Малышев, студ.;
рук. Н.М. Кураев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА ЖИЛОГО ДОМА

Среднестатистический пассажирский лифт ежемесячно проходит три тысячи километров, покрывая за двадцать пять лет расстояние в девятьсот тысяч километров, и совершая от двух до трех миллионов пусков. Только в Москве в течение суток лифты поднимают и опускают более 15 миллионов человек [1]. В связи с такой распространенностью, как и любой другой вид общественного транспорта, лифтовый парк России требует постоянного обновления.

Циклы работы лифта с электродвигателем включают участки, на которых электрическая машина работает в двигательном или генераторном режимах. Генераторному режиму соответствуют те участки, на которых происходит спуск или торможение груза.

Современный безредукторный электропривод в генераторном режиме часть получаемой энергии должен иметь возможность отдавать непосредственно в сеть или накапливать в специальном устройстве (накопителе).

Наличие накопителя энергии позволит использовать запасённую энергию для работы лифта, обеспечит возможность автономной работы лифта при кратковременных отключениях электроэнергии и повысит его энергоэффективность.

Следует отметить, что вариант электропривода с накопителем энергии позволяет обеспечивать эвакуацию пассажиров при пропадании электроснабжения лифта, а привод с устройством рекуперации энергии в сеть такой возможности не имеет.

Целью настоящей работы является разработка энергоэффективного накопителя электрической энергии в системе электропривода пассажирского лифта.

Литература

1. Лифты, платформы подъемные для инвалидов, эскалаторы. Ч. 1. Лифты: Учебник / Г.Г. Архангельский, Н.И. Балабанов, Л.В. Гуцин, А.А. Ионов, А.А. Рожков, М.А. Степанов, В.Я. Ткаченко; под общ. ред. Л.В. Гуцина. — М.: Изд-во АСВ, 2022. 680 с.

И.П. Лепилов, студ.;

рук. Е.С. Кулик, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА МЕЖСЕТЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОБМЕНА ДАННЫХ «CAN-MODBUS RTU-MODBUS TCP/IP»

В современных системах промышленной автоматизации всё чаще возникает необходимость объединения различных сетевых устройств, работающих по разным протоколам обмена данными. Для обеспечения совместимости и эффективного обмена информацией между контроллерами, датчиками и исполнительными устройствами применяются межсетевые преобразователи. Одним из востребованных решений является преобразователь, обеспечивающий обмен данными между сетями CAN, Modbus RTU и Modbus TCP/IP.

Каждый из этих протоколов имеет свои особенности. Протокол CAN (Controller Area Network) широко используется в распределённых системах управления благодаря высокой надёжности и устойчивости к помехам. Modbus RTU, в свою очередь, основан на последовательной передаче данных и отличается простотой реализации, что делает его популярным в небольших промышленных сетях. Modbus TCP/IP обеспечивает обмен данными по локальной сети Ethernet, что позволяет интегрировать устройства в общие корпоративные системы.

Однако при совместном использовании этих протоколов возникает проблема несовместимости форматов и скоростей передачи данных. Для решения этой задачи разработан межсетевой преобразователь обмена данными «CAN-Modbus RTU-Modbus TCP/IP». Устройство выполняет функции шлюза между сетями, обеспечивая прозрачную передачу сообщений и синхронизацию данных между узлами разных сетей.

В данной работе рассматриваются архитектура и принципы функционирования межсетевого преобразователя обмена данными. Особое внимание уделяется алгоритмам обработки сообщений, очередности обмена и обеспечению детерминированной передачи данных. Применение разработанного устройства позволяет объединить в единую систему оборудование с различными интерфейсами и протоколами, что повышает гибкость, масштабируемость и надёжность систем промышленной автоматизации.

В.В. Котельницкий, студ.;

рук. Д.И. Савкин, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА КЛИМАТ-КОНТРОЛЯ ЦЕХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИСКРЕТНЫХ И АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Современные производственные предприятия предъявляют повышенные требования к качеству микроклимата в цехах, поскольку стабильные параметры температуры, влажности и давления напрямую влияют на надежность технологических процессов, качество продукции и условия труда персонала. Традиционные системы климат-контроля часто не обеспечивают достаточной точности регулирования из-за ограниченных возможностей обработки сигналов от разнообразных датчиков. Поэтому применение преобразователей дискретных и аналоговых сигналов является актуальным направлением, обеспечивающим повышение точности и надежности управления микроклиматом [1].

В работе предложено решение, основанное на интеграции многофункционального преобразователя сигналов с системой автоматического регулирования параметров воздуха. Новизна заключается в использовании цифровой обработки аналоговых данных от датчиков температуры и влажности в сочетании с дискретным управлением исполнительными механизмами (вентиляцией, отоплением и увлажнением). Такой подход позволяет объединить разные типы датчиков в единую систему и обеспечить гибкую адаптацию алгоритмов регулирования к изменяющимся условиям.

Автором разработана структурная схема системы климат-контроля, выполнено моделирование работы преобразователя сигналов и реализована программная часть системы на базе микроконтроллера. Разработанное решение может быть использовано при автоматизации систем вентиляции и кондиционирования промышленных помещений, складских комплексов, лабораторий и теплиц. В дальнейшем возможна модернизация системы с применением беспроводных датчиков и внедрением удаленного мониторинга параметров через интерфейс IoT, что позволит повысить энергоэффективность и управляемость технологических процессов.

Литература

1. **Рябчицкий М.В., Королев И.В., Кулешова А.О., Нефедов В.В., Гридунов Д.В.** Современные методы мониторинга параметров электробезопасности электроустановок // Вестник МЭИ. — 2024. — № 1.

*Н.М. Горбунов, студ.;
рук. А.С. Анучин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)*

МОДЕЛЬ ДЛЯ НАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА

Вентильно-индукторные приводы (ВИП или SRD) в последние десятилетия активно исследуются благодаря простоте конструкции и высокой надёжности. Однако практическое применение вентильно-индукторных двигателей (ВИД или SRM) ограничено из-за нелинейных магнитных характеристик, значительных пульсаций момента и сложности управления. Актуальной задачей является получение в системе ВИП оптимальных механических характеристик двигателя с учётом реальных ограничений по напряжению и току инвертора.

Система ВИП является сильно нелинейной, что исключает аналитическое решение задачи определения предельных режимов. Для моделирования использована фазная модель двигателя, учитывающая нелинейное изменение индуктивности и насыщение магнитопровода. На кафедре АЭП НИУ «МЭИ» разработан алгоритм, который выполняет численное моделирование коммутационных циклов как в двигательном, так и в генераторном режимах, во всём диапазоне скоростей с поиском оптимальных параметров, максимизирующих мощность, передаваемую на вал или отдаваемую в сеть. Для поиска используется трёхмерный массив значений энергии по различным комбинациям углов коммутации и начального потока сцепления.

Результаты, полученные с использованием предложенного метода, были сопоставлены с данными работы [1], где механическая характеристика демонстрировала существенное падение мощности в начале режима непрерывной проводимости тока. Предложенный метод позволил определить оптимальные углы в разных режимах работы и увеличить максимальную выходную мощность на 8%.

Разработанная модель представляет собой универсальный инструмент для анализа, оптимизации и проектирования высокопроизводительных вентильно-индукторных приводов.

Личный вклад автора заключается в проведении модельных экспериментов и получении характерных зависимостей величин ВИП.

Литература

1. **Anuchin, A.; Lashkevich, M.; Aliamkin, D.; Briz, F.** Achieving Maximum Torque for Switched Reluctance Motor Drive over Its Entire Speed 352 Range. In Proceedings of the International Symposium on Power Electronics (PEE 2017), Novi Sad, Serbia, 19–21 October 2017; pp. 1–6. 353 <https://doi.org/10.1109/PEE.2017.8171676>.

*Ю.А. Магамадов, студ.;
рук. М.Г. Тяпкин, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО СЕРВОПРИВОДА

Высокотехнологичные производства, такие как микроэлектроника и робототехника, предъявляют высокие требования к быстродействию и точности позиционирования сервопривода. Структура прецизионного сервопривода включает в себя контроллер, сервоусилитель, серводвигатель с датчиком положения и механику системы [1].

Основная задача контроллера — планирование гладкой траектории движения, минимизирующего вибрации и динамические ошибки. Генератор траектории — это программный модуль, который формирует вектор движения, определяя законы изменения позиции, скорости и ускорения во времени с учетом физических ограничений сервопривода. Сервоусилитель реализует управление положением, скоростью и моментом, используя замкнутые контуры управления и управляющие сигналы [1].

Согласно международному стандарту (например, IEC 61800-7-201) сервоусилитель получает задание на перемещения от контроллера по средствам цифрового интерфейса. Период дискретизации при обмене данными между контроллером и сервоусилителем для современных сервоприводов составляет от 125 мкс до 4 мс. При этом период дискретизации внутренних контуров управления составляет 32,5 мкс.

Разница между периодом обновления задания и расчетом внутренних контуров управления задания нарушает требования к плавному движению. Вместо формирования непрерывного потока команд система начинает работать в режиме дискретных скачков между целевыми точками. Каждый такой скачок порождает мгновенное изменение задания по положению, что с точки зрения динамики эквивалентно бесконечно большим скоростям и ускорениям.

Для устранения вышеописанной ошибки в структуре сервопривода необходим модуль интерполяции траектории, использующий метод полиноминой интерполяции между заданиями для сглаживания заданной траектории [1].

В данной работе рассматривается модуль интерполятора на базе полинома третьего порядка. Разработана математическая модель интерполятора в среде Simentech. На основе этой модели написан программный код в среде Code Composer Studio для микроконтроллера TMS320F28335.

Литература

1. **А.П. Балковой, В.К. Цаценкин.** Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. — Москва, Изд. дом МЭИ, 2010. — 328 С.

*К.А. Сидоров, студ.;
рук. Д.И. Савкин, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНТЕРФЕЙСОВ СВЯЗИ И ПРОТОКОЛОВ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

В современных системах промышленной автоматизации всё чаще требуется интеграция на уровне цеха сетевого оборудования с устаревшими устройствами, использующими последовательные интерфейсы. Для организации такого обмена данными применяются преобразователи интерфейсов связи и протоколов, осуществляющие трансляцию между Modbus TCP и Modbus RTU. Однако существующие решения часто базируются на зарубежной элементной базе, что создаёт риски в условиях импортозамещения.

Существуют различные архитектурные подходы к проектированию таких преобразователей: на основе специализированных микросхем, программируемой логики (ПЛИС) или универсальных микроконтроллеров. Недостатком решений на базе зарубежных микроконтроллеров является их потенциальная недоступность, в то время как специализированные микросхемы обладают ограниченной гибкостью.

В данной работе рассматривается разработка преобразователя на базе отечественного микроконтроллера K1921VK01T. В предлагаемом решении реализовано двухстороннее преобразование данных: из Modbus TCP (Ethernet) в Modbus RTU (UART) и наоборот.

Принцип работы преобразователя:

- Прием пакета данных Modbus TCP по Ethernet;
- Преобразование пакета данных из Modbus TCP в Modbus RTU;
- Отправку пакета данных Modbus RTU по UART;
- Прием ответного пакета данных Modbus RTU по UART;
- Преобразование пакета данных из Modbus RTU в Modbus TCP;
- Отправка ответного пакета данных Modbus TCP по Ethernet.

В качестве дальнейшего развития преобразователя планируется реализация слоя аппаратной абстракции HAL (Hardware Abstraction Layer). Это позволит вынести все низкоуровневые операции, зависящие от конкретной микроконтроллерной платформы (такие как работа с Ethernet-контроллером, таймерами и UART), в отдельный модуль с унифицированным программным интерфейсом. Внедрение HAL обеспечит аппаратную независимость системы, упростит импортирование на любую другую микроконтроллерную базу. Таким образом, решение приобретет свойство гибкости и масштабируемости, снижая затраты на поддержку и дальнейшую адаптацию к новым компонентам в рамках программ импортозамещения.

А.Д. Афанасьев, студ.;
рук. Д.И. Савкин, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА НА БАЗЕ ОБОРУДОВАНИЯ ФИРМЫ EKF

Автоматизация технологических процессов промышленного объекта на базе оборудования EKF направлена на повышение энергоэффективности, эксплуатационной надёжности и уровня промышленной безопасности, а также на снижение доли ручных операций. В качестве аппаратной платформы рассматриваются программируемые логические контроллеры EKF PRO-Logic, панели оператора PRO-Screen и модули ввода-вывода, обеспечивающие поддержку типовых промышленных интерфейсов (RS-485, Ethernet) и протоколов обмена Modbus RTU/TCP. Такой подход позволяет реализовать единую архитектуру управления для электротехнического оборудования с возможностью масштабирования и интеграции в существующую производственную инфраструктуру.

Основной задачей работы является проектирование и внедрение системы автоматизации промышленного объекта на базе оборудования EKF с обеспечением функций контроля, управления и диагностики технологического оборудования в режиме реального времени. Необходимо разработать структуру аппаратно-программного комплекса, включающего ПЛК, HMI, периферийные модули, средства связи и удалённого доступа, а также определить алгоритмы управления, систему сигнализации и защит, требования к надёжности и отказоустойчивости. Дополнительно ставится задача обеспечить возможность тиражирования разработанного решения на другие объекты с аналогичной структурой технологического процесса.

В рамках работы сформирована архитектура системы автоматизации на базе ПЛК EKF PRO-Logic и панели оператора EKF PRO-Screen, связанных по сети Ethernet и дополняемых периферийными модулями (аналоговый и дискретный ввод-вывод, модули измерения температуры, частотный преобразователь и измерительные приборы), объединёнными по RS-485/Modbus. Разработаны и реализованы алгоритмы управления основным технологическим оборудованием, включая контуры регулирования, межблокировки, аварийную и предупредительную сигнализацию, а также функции архивирования ключевых параметров и событий. Обеспечено HMI-представление с отображением технологических схем, трендов, журналов аварий и сервисных сообщений, а также реализован удалённый мониторинг и управление с использованием средств связи и специализированных коммуникационных устройств.

*А.М. Камалов, студ.;
рук. Д.И. Савкин, ст. преподаватель (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО РАБОТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ ПО КУРСУ «ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ» НА БАЗЕ ОБОРУДОВАНИЯ EKF

Подготовка специалистов в области электропривода и автоматизации требует практико-ориентированных стендов с современным оборудованием и типовыми промышленными интерфейсами, что повышает качество обучения и соответствие компетенций требованиям рынка труда. Цель работы — спроектировать и реализовать на кафедре Автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ» модульный учебный комплекс для курса «Элементы систем автоматики» с методическим обеспечением и набором лабораторных работ на базе оборудования компании EKF.

В работе предложен целостный учебный комплекс с единообразием по питанию 24 В DC, интерфейсам RS-485/Ethernet и протоколам Modbus RTU/TCP, обеспечивающий быструю интеграцию модулей и расширяемость стенда. Комбинация ПЛК EKF PRO-Logic, HMI PRO-Screen и периферии (аналоговые и температурные модули, преобразователь частоты, датчики, измерительные приборы, GSM/Wi-Fi-контроллер) позволяет охватить ключевые разделы курса в единой архитектуре.

Разработаны структуры методического пособия и лабораторных работ, которые включают пошаговые инструкции, схемы соединений, типовые проекты, контрольные вопросы и задания на самостоятельную модификацию алгоритмов, а также фирменные утилиты конфигурирования модулей и ePRO24 Omni (применяется оборудование PRO-Logic (IEC 61131-3) и PRO-Screen Designer).

Конструкция стенда выстроена модульно с едиными принципами коммутации и маркировки, размещением устройств на DIN-рейках и защитным корпусом; предусмотрены требования по электробезопасности и условиям эксплуатации. Схемы связей: Ethernet между ПЛК и HMI, RS-485/Modbus для модулей ввода/вывода, привода и измерителей, а также интеграция ePRO24 Omni через RS-485/Ethernet.

Стенд обеспечит практические навыки студентов в конфигурировании ПЛК/HMI, работе с аналоговыми и дискретными сигналами, работе с частотным преобразователем и сетевом обмене данными, а также в методиках ПИД-регулирования и удалённого доступа (ПоТ-сценарии). Внедрение стенда повышает наглядность и качество обучения, сокращает время подготовки лабораторий и улучшает соответствие учебного процесса современным требованиям промышленной автоматизации.

С.Е. Савченко, студ.;
рук. Д.М. Шпак, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА ОБМЕНА ДАННЫМИ В СИСТЕМЕ С ДВУМЯ КОНТРОЛЛЕРАМИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ СДПМ

В комплексных системах управления электропривода для повышения надежности работы используется несколько контроллеров и преобразователей частоты. Взаимодействие контроллеров внутри системы, протоколы обмена данными и отработка защит являются важной частью этой системы.

Целью работы стала разработка протокола обмена данными, позволяющего системе управления знать о состоянии всех компонентов внутри. А именно, что каждый контроллер диагностирует состояние всех плат и состояние второго контроллера, что позволяет обрабатывать аварийные ситуации точнее и быстрее. Также это упрощает диагностику системы, позволяя при аварии проверить состояния с любой платы.

Преимущество такого подхода в том, что обмен состояниями происходит постоянно, что также позволяет обеспечить функцию проверки линии связи, по которой идет взаимодействие.

Весь проект включает в себя модель в MATLAB системы электропривода на базе СДПМ при питании обмоток от двух независимых преобразователей частоты, оценку разных способов управления СДПМ, разработку опытного образца системы на базе отечественных микроконтроллеров, работу с экспериментальным стендом, а также необходимую рабочую документацию. Основной обмен данными между контроллерами, будет происходить по протоколу CAN, а обмен с пультом управления по протоколу RS485.

Литература

1. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / А.С. Анучин. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2015 — 373 с.

*Н.Н. Иванова, студ.;
рук. М.С. Куленко, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)*

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ И ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Значительное количество аварий и остановов технологических процессов на промышленных предприятиях происходит из-за нарушения работоспособности электроприводной арматуры (ЭПА), что приводит к невыполнению ею основных функций: открытие/закрытие, потеря герметичности в затворе и по отношению к внешней среде [1].

Анализ литературы и нормативной документации [2] позволяет утверждать, что перечисленные отказы могут быть вызваны целым рядом причин: износом запорной арматуры из-за нарушений условий ее эксплуатации, заложенными на стадии проектирования ошибками, нарушением порядка проведения сервисного обслуживания.

В условиях плановых ремонтов, длящихся менее месяца, возникает сложная задача оперативной оценки технического состояния более тысячи единиц ЭПА различных типоразмеров и конструкций. Традиционные стратегии планово-предупредительных ремонтов, осуществляемые по регламенту, не учитывают фактическое состояние оборудования, что может приводить как к необоснованным затратам, так и к пропуску развивающихся дефектов. В связи с этим, актуальной становится задача внедрения системы диагностирования, позволяющей перейти к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

С целью снижения риска возникновения причин ведущих к отказам ЭПА и к потере ею работоспособности проведен многофакторный анализ и систематизация наиболее часто встречающихся дефектов, а также определения степени их критичности.

Выявлены наиболее критические отказы: «невыполнение функции открытие-закрытие», «увеличение времени срабатывания» и «отказ системы электрического управления. Установлены отказы, взаимно провоцирующие друг друга, например, «невыполнение функции «открытие закрытие» и «увеличение времени срабатывания сверх допустимого».

Полученные результаты позволяют разработать целевые корректирующие мероприятия, направленные на повышение надежности системы «электропривод — арматура» в целом.

Литература

1. **Елисеева Т.А.** Анализ безопасности электроприводной запорной арматуры методом АВПКО // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула: ТулГУ. 2013. С. 182–186.
2. **НП-068-05.** Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования.

Секция 27
ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
Industrial electric-thermal installations

Председатель секции: д.т.н., доцент Федин Максим Андреевич

Секретарь секции: Василенко Александра Ильинична

Д.А. Савёлов, студ.;

рук. М.А. Булатенко, к.э.н., доц. (РТУ МИРЭА, Москва)

SWOT-АНАЛИЗ РАЗВЕТВЛЕННЫХ СКИН-КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА С ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ ТЕРМОКОНТРОЛЯ

Разветвленная скин-кабельная система электрообогрева обладает значительными преимуществами, которые делают ее перспективной для применения в нефтегазовой и других отраслях промышленности [1, 2]. Система отличается экологической безопасностью, так как исключает использование вредных теплоносителей и снижает углеродный след, что соответствует современным требованиям по охране окружающей среды.

Важным преимуществом является интеграция цифрового двойника, который обеспечивает мониторинг и управление системой в реальном времени. Использование интеллектуальных алгоритмов обработки данных позволяет прогнозировать возможные отказы, оптимизировать работу оборудования и поддерживать стабильность температурного режима.

Однако проект имеет и слабые стороны: высокие стартовые инвестиции, связанные с разработкой, закупкой оборудования и внедрением системы, сложность интеграции системы в существующую инфраструктуру трубопроводов, необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов. Несмотря на существующие ограничения, государственная поддержка, включая субсидии и гранты на разработку инновационных технологий, способствует ускорению внедрения системы. А также система может быть адаптирована для применения в других отраслях, таких как энергетика и ЖКХ, что расширяет ее рыночный потенциал.

Однако проект сталкивается с рядом угроз, которые необходимо учитывать. Конкуренция со стороны традиционных систем обогрева, таких как паровые или масляные, может замедлить процесс внедрения. Экономические факторы, такие как колебания цен на материалы и электроэнергию, могут повлиять на себестоимость и сроки окупаемости.

Литература

1. Сангалиев Х.Ф., Ареев Я.В., Булатенко М.А., Федин М.А. Методика разработки современных разветвленных скин-кабельных систем электрообогрева // Технологии будущего. Сборник трудов X Всерос. науч.-тех. конф. М.: МЭИ, 2025. С. 289–302.
2. Федин М.А., Калинин В.А., Негрбов Я.С., Булатенко М.А., Гераскин А.Ю. Разработка и экспериментальное исследование системы электрического обогрева с термоконтролем на основе пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры // Промышленная энергетика. 2025. № 1. С. 16–23.

А.Ю. Соколов, соиск.;
рук. А.Н. Макаров, д.т.н., проф. (ТвГТУ, Тверь)

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ МЕТАЛЛА И ШЛАКА В МОЩНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ПЛАВКИ СТАЛИ

Целью работы является анализ распределения температур по поверхностям нагрева в ванне мощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП).

На основе анализа сложного теплообмена и теплового баланса в ванне, а также результатов измерений температур металла и шлака, построены изотермы, характеризующие распределение температур по поверхностям ванны металла и шлака в высокомогущной электропечи ДСП-135 (рис. 1).

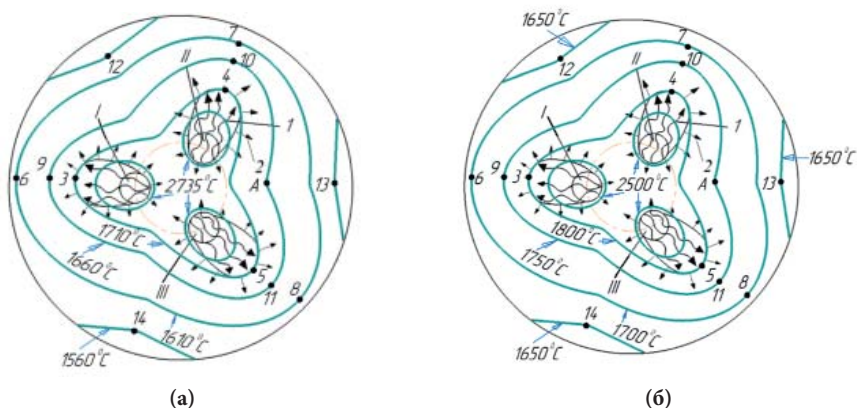


Рис. 1. Изотермы по поверхности металла (а) и шлака (б) в конце плавки в ДСП-135:
I, II, III — электроды фаз; 1, 2 — теплообмен в ванне конвекцией и теплопроводностью;
3–5, 6–8, 9–11, 12–14 — характерные точки, принадлежащие изотермам;
А — зона постоянного контроля температуры на поверхности металла и шлака

В работе дано описание разработанной методики расчета, позволяющей по параметрам электротехнологического режима плавки, расходу электро-энергии, температуре металла и шлака в начале и середине окислительного периода контролировать количество нерасплавленной шихты на откосах и принимать меры для ее расплавления и выравнивания температурного поля по объему жидкометаллической ванны в окислительный период плавки.

Литература

1. Макаров А.Н., Крупнов А.В., Соколов А.Ю. Взаимосвязь электрического режима и теплообмена в высокомогущных дуговых сталеплавильных печах с учетом высоты шлака и запыленности атмосферы // Промышленная энергетика. 2023. № 2.
2. Макаров А.Н., Соколов А.Ю., Корнеев К.Б. Теплообмен дуг в ванне металла электродуговых сталеплавильных печей. Часть II. Построение изотерм по поверхности шлака и ванны металла // Энергоресурсосбережение в промышленности. 2025.

А.В. Рогачёв, студ.;
рук. М.А. Федин, д.т.н., проф.,
М.А. Булатенко, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ОБОГРЕВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

В процессе транспортировки нефти систематически применяются разные присадки (к примеру — депрессорная и противотурбулентная), которые имеют разный температурный диапазон застывания (кристаллизации), что приводит в условиях сурового климата к необходимости обеспечения стабильной температуры транспортируемой среды и возможности её регулировок. На большинстве нефтегазовых месторождений обогрев технологических трубопроводов производится посредством саморегулирующегося нагревательного кабеля, характеризующегося рядом недостатков [1, 2].

В данном исследовании предлагается реализовать систему промышленного индукционного нагрева с частотой от 1 до 3000 Гц. Источником энергии является средне- или высокочастотный генератор частоты, формирующий в индукторе импульсы тока заданной мощности и определенной частоты на основе ШИМ-модуляции. Индуктор, предназначенный для передачи электромагнитной энергии в нагреваемый объект, представляет собой электрический проводник с изоляционным материалом. Его форма при этом повторяет форму нагреваемого объекта. Температура индуктора близка к температуре окружающей среды и практически не зависит от температуры нагреваемого объекта.

В следствии электромагнитной индукции токи, проходящие по индуктору, создают на поверхности металла переменное вихревое электромагнитное поле, которое индуцирует в металле вихревые токи (токи Фуко), которые и производят требуемый нагрев поверхности.

Система индукционного обогрева трубопроводов показывает высокую эффективность, обеспечивая быстрый и равномерный нагрев всей поверхности трубы, поскольку тепловыделение происходит непосредственно в стенках трубопровода минимизируя потери тепла через изоляцию.

Литература

1. Харин С.В., Щербинин А.Г. Исследование процессов резистивного нагрева трубопроводов // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 117–129.
2. Смирнов В.В., Сихвордт С.А. Сравнительный анализ полезного распределения тепла систем электрообогрева технологических трубопроводов // Вестник ЮГУ. 2015. № S2 (37). С. 114–120.

Р.Ю. Кортиев, студ.;

рук. М.А. Булатенко, к.э.н., доц. (РТУ МИРЭА, Москва)

СРАВНЕНИЕ СКИН-СИСТЕМ С ПАРОВЫМИ СИСТЕМАМИ ОБОГРЕВА ТРУБОПРОВОДОВ

Обогрев трубопроводов необходим для обеспечения стабильной транспортировки нефти и предотвращения образования парафина и кристаллизации воды. На протяжении XX века паровые системы обогрева широко использовались в промышленности. Однако сегодня они становятся морально и физически устаревшими. Основные недостатки паровых систем включают высокие эксплуатационные затраты, низкую энергоэффективность, ограниченные возможности автоматизации, экологические риски, связанные с утечками теплоносителя [1].

В свою очередь, скин-системы представляют собой современную альтернативу, обеспечивающую высокую энергоэффективность, точное управление и экологическую безопасность [2].

Скин-системы по сравнению с паровыми системами обогрева обеспечивают снижение эксплуатационных затрат благодаря снижению тепловых потерь, отсутствию необходимости в постоянной подаче топлива и воды, уменьшению затрат на обслуживание.

Потери энергии в паровых системах связаны с транспортировкой пара и его конденсацией. В скин-системах энергия передается непосредственно к трубопроводу, что минимизирует потери. Паровые системы подвержены рискам утечек и коррозии, что приводит к аварийным ситуациям. Скин-системы, благодаря отсутствию теплоносителя, являются более надежными и безопасными.

Скин-системы не используют воду и топливо, что исключает выборы углекислого газа и загрязнение окружающей среды. Паровые системы, напротив, требуют значительных ресурсов и сопровождаются выбросами в атмосферу. Хотя первоначальные инвестиции в скин-систему могут быть выше, их окупаемость достигается за счет значительного снижения эксплуатационных затрат и долговечности системы.

Литература

1. Сычёва У.Г., Арабов М.Ш. Анализ работы пароспутников для обогрева технологических аппаратов, трубопроводов, приборов «КИП И А» на астраханском ГПЗ // Вектор научной мысли. 2024. № 12 (17). С. 281–283.
2. Федин М.А., Качалина Е.В., Молостова А.В., Федина С.А., Василенко А.И., Зотов М.Л., Демидов Ю.А. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов // Промышленная энергетика. 2023. № 12. С. 2–9.

*А.А. Слесарев, студ.;
рук. М.А. Булатенко, проф., к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

По данным туроператора PAC Group, в 2025 году рост спроса на морские круизы растёт с каждым годом, так продажи в 2025 году по сравнению с 2024 годом возросли на 53%. Весной 2026 года планируют запустить проект «Тихоокеанский круиз», который свяжет Приморье, Сахалин, Курилы и Камчатку. Маршрут должен привлечь на Дальний Восток до 50 тысяч туристов ежегодно. В местах модульных помещений на кораблях, где возможна высокая влажность и коррозионное воздействие соляного тумана необходимо обеспечить надежный и безопасный обогрев. Устанавливаемые нагревательные элементы должны быть влагозащищены (IP67) и устойчивы к коррозии, а также обладать компактными размерами.

В данном исследовании оценивается возможность применения электронагревательных панелей САО.КТ-250 и САО.КТ-250-Т серии «ЭНЕРГОСПУТНИК™», производимые ООО ПП «САНТО ТЕРМАЛ КОНТРОЛ ТЕХНОЛОДЖИ», в передовых российских проектах, таких как «смарт-каюты» от «НПК Морсвязьавтоматика». В этих панелях нагревательный элемент изготавливается под размер требуемого корпуса, вкладывается между слоями диэлектрических материалов и полностью заливается силиконовой высокотемпературной смесью, что обеспечивает надежную защиту и включает в себя герметизацию соединительной коробки.

Для резистивного нагревательного элемента, работающего в условиях высокой влажности, соляного тумана и требований к долговечности, оптимальным выбором является сплав Инконель. Он образует на своей поверхности прочную оксидную пленку, которая защищает основной материал от дальнейшего окисления, а также, как и нихром, Инконель обладает высоким и стабильным удельным сопротивлением, что обеспечивает постоянство мощности нагревателя [1].

САО.КТ-250-Т в отличие от САО.КТ-250 комплектуется специальным креплением на корпусе для монтажа термосопротивления, что позволяет интегрировать панель в систему автоматического регулирования температуры, что особенно актуально для проектов типа «смарт-каюты».

Литература

1. Байназаров И.Н., Большаков Д.Б., Косяков М.Д. Техничко-экономическая целесообразность повышения устойчивости материалов для конструкций морской инфраструктуры под действием высокого давления и низких температур // Human Progress. 2024. № 12. С. 3. URL: http://progress-human.com/images/2024/Tom10_12/Bolshakov.pdf

Л.А. Аракелян, асп.;

рук. М.А. Федин, проф., д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РАЗОГРЕВА ПОЛУВАГОНОВ И ЦИСТЕРН

Зимняя разгрузка железнодорожных полувагонов со смерзшимся углем и цистерн с загустевшим мазутом представляет серьезную технологическую проблему для тепловых электростанций. Применяемые сегодня методы, такие как разогрев открытым паром или рециркуляция горячего продукта, требуют много времени и энергии. Например, прогрев одной цистерны может занимать до 15 часов. Кроме того, эти способы приводят к ухудшению качества топлива и значительным финансовым затратам, достигающим 1200 рублей на один вагон. В связи с этим разработка новых, более эффективных и экономичных методов разогрева является крайне важной задачей.

В рамках исследований был предложен новый способ индукционного разогрева, основанный на режиме с переменной температурой нагревательных элементов. Такое решение позволяет сократить время разогрева на 15–20% по сравнению с существующими аналогами. Были разработаны комплексные математические модели, описывающие совместное протекание электромагнитных и тепловых процессов в системах «индуктор-полувагон с углем» и «индуктор-цистерна с мазутом». Важной особенностью моделей является учет реальных условий эксплуатации, включая соблюдение требований ГОСТ 22235-2010 к температурным режимам подвижного состава.

Внедрение таких установок на топливных складах ТЭС и железнодорожных узлах позволит добиться нового уровня эксплуатации. Мы ожидаем, что это обеспечит круглогодичную бесперебойную выгрузку топлива, сократит время простоя вагонов в 2–3 раза и снизит эксплуатационные расходы на четверть или даже на треть. Важно, что при этом полностью исключается проблема обводнения топлива.

Литература

1. **А.Б. Кувалдин, М.А. Федин** / Теория индукционного нагрева: В 2 ч. Ч. 1: Основные характеристики и расчет параметров электромагнитного поля // М.: Издательство МЭИ, 2018.

В.В. Рогозин, студ.;

рук. М.А. Федин, проф., д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВИДОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ С ИРСН И МЕТОДИКА ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАСЧЕТАХ УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Актуальность работы обусловлена активным внедрением индукционно-резистивных систем нагрева (ИРСН) для обогрева промышленных трубопроводов. Специфика таких сетей, включающая распределенные параметры и наличие индуктивной связи, создает новые виды токов короткого замыкания (КЗ), которые не полностью учитываются традиционными методиками расчетов релейной защиты (РЗ). Это требует разработки специализированных подходов для обеспечения селективности и надежности срабатывания защитных устройств.

Новизна исследований заключается в систематизации характерных видов КЗ для сетей с ИРСН и разработке комплексной методики их математического и имитационного моделирования. Предложенный подход позволяет точно рассчитывать токи КЗ с учетом взаимного влияния нагревательных элементов и питающей сети, что является развитием существующих методов, описанных в литературе [1].

На основе анализа возможных повреждений в типовой схеме ИРСН рассчитаны токи короткого замыкания и уставки релейной защиты, разработан алгоритм имитационного моделирования и проведена верификация расчетных методик путем сравнения с теоретическими данными.

Полученные результаты позволяют существенно повысить точность настройки релейной защиты систем электрообогрева. Разработанная методика моделирования КЗ имеет практическую ценность и может быть использована при проектировании и эксплуатации разветвленных скин-систем для обеспечения их бесперебойной и безопасной работы в рамках перспективных проектов, таких как разработка систем с цифровым двойником.

Литература

1. М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / 2-е изд. — Вологда : Инфра-Инженерия. 2023. — 524 с.

Ю.В. Киселёв, студ.;

рук. С.М. Нехамин, д.т.н., М.А. Федин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ

Ключевые слова: кипящий слой, карбид кремния, энергоэффективная технология.

Карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для высокотемпературной электроники, силовой электроники, композитов и нанофотоники. Существующие методы синтеза (например, метод Ачесона) энергоемки, требуют высоких температур ($>2000^{\circ}\text{C}$) и приводят к неоднородности продукта [1, 2].

В рамках текущего исследования предлагается новая энергоэффективная технология, позволяющая получать SiC с контролируемой морфологией при рабочей температуре синтеза от 1300°C до 1600°C . Электротехнологическая установка включает вертикальный реактор с реакционной зоной — кипящим слоем, создаваемым потоком предварительно разогретого инертного газа (например, Аргона).

Основной нагрев осуществляется прямым пропусканием тока через загруженные в реактор реагенты, что создает мощный и регулируемый тепловой поток. Горячий газ обеспечивает конвективный нагрев и псевдооживление слоя. Процесс синтеза карбида кремния и его наноструктур основан на реакции карботермического восстановления SiO_2 .

Режим кипящего слоя обеспечивает высокие коэффициенты тепло- и массообмена между твердыми реагентами (SiO_2/C) и газовой фазой, что резко ускоряет кинетику реакции карботермического восстановления. Управляя параметрами псевдооживления (скорость газа, температура) и составом шихты, можно получить различные структуры карбида кремния (высокодисперсный порошок, нанопроволоки, покрытие на элементах реактора).

Стоит отметить, что синтез SiC в условиях интенсивного перемешивания исключает образование локальных перегревов и агломератов и обеспечивает высокую степень однородности конечного продукта.

Литература

1. **Мармер Э.Н.** Высокотемпературные вакуумные технологии и электропечи для термообработки и спекания // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 2. С. 22–75.
2. **Квашина Т.С., Крутский Ю.Л., Черкасова Н.Ю., Кузьмин Р.И., Тюрин А.Г.** Синтез высокодисперсного карбида кремния из разных шихтовых материалов // Доклады АН ВШ РФ. 2017. № 4 (37). С. 80–90.

*С.И. Скрипниченко, асп.; К.В. Мильский, асп.;
П.М. Данильцин, студент;
рук. С.М. Нехамин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДСП-6 С АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Адаптивная система должна в зависимости от стадий плавки изменять длину дуги, от которой так же будет зависеть вводимая мощность, но основным является определение процесса плавки со своевременным переключением ступеней трансформатора и выбором оптимальной точки исходя их рабочих и электрических характеристик для выбранной ступени трансформатора. Для этого во время каждой плавки нужно строить в реальном времени электрические и рабочие характеристики и в зависимости от стадий определять при каком сопротивлении дугового промежутка нужно проводить плавку.

Создание нового алгоритма управления энергетическим режимом печи, является целью исследования. Новый алгоритм управления обеспечит стабильную работу полностью в автоматическом режиме работы печи.

Создание математических моделей для сбора информации и построения рабочих характеристик на всех ступенях трансформатора, а также модели для отработки нового регулятора являются приоритетными задачами исследования.

Для работы регулятора по сопротивлению дуги, в начале каждой плавки, мы должны отслеживать эксплуатационные короткие замыкания и снимать данные активного сопротивления токоподвода к печи R_i и его индуктивную составляющую L_i , для того чтобы при расчете сопротивления дуги, можно было вычесть активную и индуктивную составляющую сопротивления токоподвода. Определённые спомощью системы уравнений на каждом полупериоде параметры электрической цепи ДСП используются для построения осциллограммы напряжения на следующем полупериоде той же полярности.

Литература

1. Восстановление параметров динамической модели дуги дуговой сталеплавильной печи С.М. Нехамин, д-р техн. наук, проф., А.Н. Журкин, С.И. Скрипниченко, *ЭлектроМеталургия* 6/2024
2. С.И. Скрипниченко, студ.; рук. С.М. Нехамин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ») РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДСП-6 С АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ, РАДИО-ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тридцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля — 2 марта 2024 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2024. — 1342 с.

П.В. Петров, студ.;
рук. М.А. Федин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ОТБОРА МОЩНОСТИ

В настоящее время индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), принцип действия которых базируется на использовании поверхностного эффекта и эффекта близости, представляют собой наиболее совершенное. Техническое решение для задач электрообогрева магистральных трубопроводов. Данные системы получили широкое распространение для поддержания температурного режима протяженных технологических трубопроводов, транспортирующих нефть, природный газ, мазут, серу и другие среды.

В рамках данного исследования сформулирована новая научно-техническая проблема, связанная с созданием системы электрообогрева, адаптированной для эффективной работы в условиях разветвленной инфраструктуры, включающей транспортные трубопроводы, выкидные линии скважин и отводы. Такой подход является инновационным по сравнению с традиционными системами, рассчитанными на линейные участки.

Реализация в ИРСН принципа разветвления позволяет сократить количество точек подключения греющих кабелей за счет применения вторичных источников питания. Эти источники, представляющие собой специализированные трансформаторы для внутрисистемной передачи электроэнергии, дают возможность отбирать мощность от основной ИРСН и использовать её для питания дополнительных ИРСН или греющих контуров, что также способствует оптимизации теплового распределения в сложных конфигурациях трубопроводных сетей [1–2].

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка современных разветвленных скин-кабельных систем электрообогрева с цифровым двойником и пространственной цифровой системой термоконтроля» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.».

Литература

1. М.А. Федин, Е.В. Качалина, А.И. Василенко и др. / Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов // Промышленная энергетика. 2023. № 12. С. 2–9.
2. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. — 1963.

Х.Ф. Сангалиев, студ.;
рук. М.А. Федин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СКИН-КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА

Современные трубопроводные системы, используемые в нефтегазовой, химической и энергетической отраслях, характеризуются сложной пространственной конфигурацией, наличием большого числа ответвлений и необходимости поддержания стабильного температурного режима для обеспечения технологической текучести транспортируемых сред [1, 2].

При разработке электротепловой математической модели разветвленной скин-кабельной системы электрообогрева был упор на методику декомпозиции и программирования.

Была декомпозирована сложная система на отдельные участки, математическая модель каждого участка включает систему уравнений, описывающих электромагнитные и тепловые процессы.

Целью теплового расчета трубопровода является определение требуемой мощности скин-системы электрообогрева. Была получена электротепловая модель протяженного трубопровода, а для определения параметров точек отбора мощности был проведен расчет тепловых потерь через фланцевые соединения, опорные конструкции, запорную арматуру и фильтры посредством моделирования в COMSOL Multiphysics. В модели были учтены теплопроводность материалов, плотность, удельная теплоёмкость при постоянном давлении, а также характеристики потока жидкости внутри трубопровода.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка современных разветвленных скин-кабельных систем электрообогрева с цифровым двойником и пространственной цифровой системой термоконтроля» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.».

Литература

1. Антипов Ю.А., Хассан Х., Жариков И.А. Оценка гидравлических и тепловых потерь в магистральных нефтепроводах в условиях холодного климата // Нефтегазовое дело, 2018, т. 16, № 2, С. 99–105, DOI: 10.17122/ngdelo-2018-2-99-105 recommended by MPI. University of Nis: Faculty of Electronics, 2004.198 p.
2. Машкова Е.Г., Юсупова М.И. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в неизотермическом трубопроводе // Инновационные аспекты развития науки и техники. 2020. № 3. С. 45–51.

П.М. Данильцин, студ.;
рук. С.М. Нехамин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ НА ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С НЕРАСХОДУЕМЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В отличие от ручного сварочного автомата вакуумная дуговая печь с нерасходуемым электродом предлагает полную автоматизацию процесса плавки. Обычно эти электротехнологические установки включают привода штока, управляемый источник питания, вакуумную систему, систему охлаждения, электрическую камеру наблюдения и многое другое. Целью данного исследования будет исследование аргоновой дуги постоянного тока на токах от 50 до 550 А для межэлектродного промежутка от 5 до 50 мм для определения наиболее энергоэффективного режима плавки дугой.

Энергия дуги расходуется на нагрев и поддержание необходимой температуры плазмы, рассеивание за счет излучения, а так же на мощности, идущие в катод и в анод. Последняя составляющая фактически и определяет полезную энергию нагрева металла. С другой стороны главной целью плавки является полное расплавление металла в лунке, для чего необходимо снизить коэффициент конвекции на охлаждаемой водой поверхности тигля. Таким образом, задача связывает скорость воды, ток и межэлектродный промежуток.

Для исследования было проведено моделирование физики дугового нагрева с помощью уравнений магнитной гидродинамики. В рамках исследования приводится тепловой баланс дуги, распределение теплового потока к аноду, температурные поля в металле, плазме и т.д.

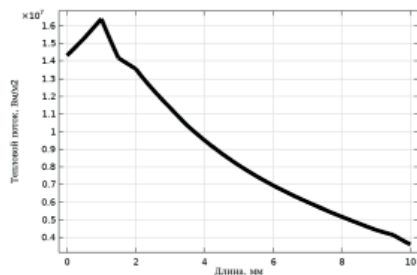


Рис. 1. Тепловой поток на анод при длине дуги 30 мм и токе 500 ампер

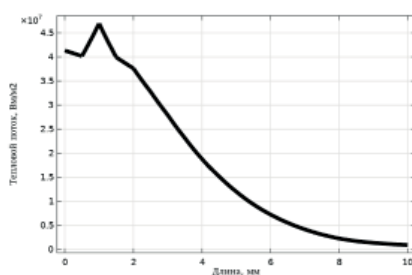


Рис. 2. Тепловой поток на анод при длине дуги 5 мм и токе 500 ампер

Литература

1. Comsol multiphysics reference manual // Comsol: электронно-библиотечная система. URL: <https://doc.comsol.com/6.3/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>

*К.В. Мильский, асп.; С.И. Скрипниченко, асп.;
П.М. Данильцин, асп.;
рук. С.М. Нехамин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДСП ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СТАТИЧЕСКИМ ТРАНЗИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Дуговые электрические печи переменного тока (ДСП) являются нестационарной и нелинейной нагрузкой для энергосистемы и характеризуются низким коэффициентом мощности и значительным колебанием напряжения сети в точке подключения ДСП.

Известны различные методы компенсации реактивной мощности и колебаний напряжения сети. Наиболее эффективный и в то же время наиболее дорогой это установка статического синхронного компенсатора (STATCOM), подключаемого обычно на стороне первичной обмотки печного трансформатора, являющегося по сути статическим генератором реактивной мощности, позволяющим за счет буфера в виде конденсаторной батареи потреблять или генерировать необходимый ток для компенсации реактивной мощности [1].

В статье предлагается способ компенсации реактивной мощности подключением статического транзисторного преобразователя (СТП) с согласующим трансформатором параллельно печному трансформатору. Преимуществом данного метода является то, что он позволяет при модернизации существующей ДСП, помимо улучшения качества потребляемой энергии, поднять мощность ДСП без замены печного трансформатора [2].

На данный момент выполнено математическое моделирование, разработана и изготовлена экспериментальная лабораторная установка и получены положительные результаты экспериментов с однофазной дуговой нагрузкой мощностью 5 кВт.

Литература

1. **Samet H., Jarrahi M.A.** A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data. 30th Power System Conference (PSC). Tehran, 2015, pp. 300–304.
2. **Нехамин С.М., Чурсин А.Ю., Журкин А.Н., Мильский К.В., Скрипниченко С.И.** Повышение энергетической эффективности и производительности дуговых сталеплавильных печей при их модернизации без замены трансформатора. Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XIX Всероссийской конференции с международным участием. Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ 2024 г.

П.М. Данильцин, асп., С.И. Скрипниченко, асп.,
К.В. Мильский, асп; рук. С.М. Нехамин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ НА ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С НЕРАСХОДУЕМЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом необходимо разработать полную автоматизацию процесса плавки. Обычно эти электротехнологические установки включает привода штока, управляемый источник питания, вакуумную систему, систему охлаждения, электрическую камеру наблюдения и многое другое. Целью данного исследования будет исследование аргоновой дуги постоянного тока на токах от 50 до 550 А для межэлектродного промежутка от 1 до 30 мм для определения наиболее энергоэффективного режима плавки дугой.

Энергия дуги расходуется на нагрев и поддержание необходимой температуры плазмы, на рассеивание за счет излучения, а так же на мощности, идущие в катод и в анод. Последняя составляющая фактически и определяет полезную энергию нагрева металла. Таким образом, задача связывает коэффициент охлаждения, ток и межэлектродный промежуток.

Для исследования было проведено моделирование физики дугового нагрева с помощью уравнений магнитной гидродинамики. В рамках исследования рассчитывается тепловой баланс дуги, распределение теплового потока к аноду, температурные поля в металле, плазме и т.д.

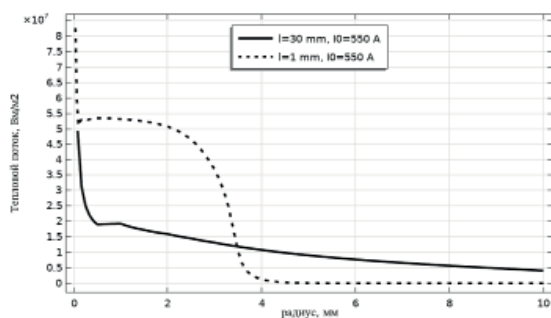


Рис. 1. Тепловой поток на анод при длине дуги 1 и 30 мм и токе 550 ампер

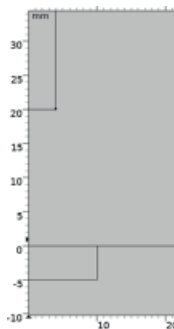


Рис. 2. Геометрия модели

Литература

1. Comsol multiphysics reference manual // Comsol: электронно-библиотечная система. URL: <https://doc.comsol.com/6.3/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>
2. Comsol multiphysics plasma module user's guide // Comsol: электронно-библиотечная система. URL: <https://doc.comsol.com/6.3/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>

Е.В. Шиндин, асп.;
рук. М.А. Федин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)

ЭЛЕКТРООБОГРЕВ ТРУБ И РЕЗЕРВУАРОВ

В промышленности часто возникает необходимость обогрева труб и резервуаров, по которым передвигаются ресурсы и материалы, такие как нефть и мазут, а также обогрева цистерн в которых транспортируются материалы. При этом нормальной рабочей температурой материалов является температура в диапазоне 15–30 градусов, что в зимний период времени при низких температурах окружающей среды требует дополнительного нагрева. Один из эффективных способов обогрева является использование электрообогрева. Электрообогрев — это система обогрева, в которой тепло вырабатывается благодаря электрическому току, протекающему через специальные нагревательные элементы.

Преимущества использования электрообогрева в промышленности многочисленны. Во-первых, данные системы обладают значительной эффективностью, так как всего имеют маленькие потери тепла при соприкосновении с окружающей средой. Во-вторых, электрообогрев легко регулируется и дает возможность точно поддерживать заданную температуру на установках. В третьих, электрообогрев характеризуется высокой экологичностью и безопасностью. Он не выделяет вредных веществ и не создает шума или запаха, а также не требует хранения топлива. В-четвертых, система легко монтируется и не требует сложной технической поддержки.

Электрообогрев труб и резервуаров может быть выполнен различными способами, в зависимости от требований и условий эксплуатации. Основные типы электрообогрева включают: обогрев на основе греющих кабелей, обогрев на основе использования пара, обогрев водной системой, индукционный обогрев.

Электрообогрев — это эффективное, экологически чистое и удобное средство обогрева в промышленности. Он помогает сэкономить ресурсы, повысить качество продукции, улучшить условия труда и безопасность на производстве.

Литература

1. **Кувалдин, А.Б.** Низкотемпературный индукционный нагрев стали / А.Б. Кувалдин, Л.Е. Никольский, С.П. Розанов, Ю.Л. Рыжев, А.Д. Свенчанский, М.А. Шевцов, К.З. Шепеляковский, Ф.И. Шуманский // Библиотека электротермиста. Вып. 62 — Москва: Энергия, 1976. — С. 80–87.
2. **Струпинский, М.Л.** Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли: справочник / М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин // 2-е изд. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023 — С. 13–47.

*Н.В. Милютин, соискатель;
рук. А.Н. Макаров, д.т.н., проф. (ТвГТУ, Тверь)*

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ ОТ ДОУ ДО СТЕН НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

С увеличением вместимости печей расстояние от дуг до стен возрастает. Тепловое излучение дуг, проникающее через полости шихты до футеровки стен, снижается, КПД дуг возрастает, удельный расход электроэнергии снижается. В печах ДСП-20, ДСП-50, вместимостью 25 и 50 тонн соответственно $q_T = 440\text{--}420$ кВт·ч/т [1]. Наивысшее КПД дуг и наименьший расход электроэнергии достигается 100-тонных ДСП, которые составляют соответственно 80%, $q_T = 360$ кВт·ч/т. С ростом вместимости ДСП увеличивается расстояние от дуг до стен и тепловое излучение дуг через шихту не достигает стен при резке колодцев и расплавлении шихты. Однако, с ростом вместимости печей диаметр кожуха на откосах, а тепловой поток теплопроводности на шихту на откосах снижается. В печах ДСП-120, ДСП-135, ДСП-180 расстояния до ближайшей точки панели стен, расположенной напротив дуги соответственно равны 2,53; 2,75 и 3,1 метрам. Поток теплопроводности от горячих зон под дугами к шихте на откосах меньше по сравнению с аналогичными тепловыми потоками в ДСП-100. В печах ДСП-120, ДСП-135, ДСП-180 поток теплопроводности от горячих зон под дугами недостаточен для быстрого расплавления шихты на откосах. Для быстрого расплавления шихты на откосах в печах ДСП-120, ДСП-135, ДСП-180 вынуждены к потокам теплопроводности из горячих зон под дугами к шихте на откосах добавлять потоки излучения дуг, меняя высоту шлака и частично открывая дуги. При частично открытых дугах КПД дуг η_d в печах ДСП-120, ДСП-135, ДСП-180 снижается, соответственно до 76, 73, 70%, а удельный расход электроэнергии увеличивается до значений соответственно 375, 385, 390 кВт·ч/т.

Литература

1. **Дорофеев Г.А. [и др.]**. Металлургия железа — от огня Прометея к термической плазме / Г.А. Дорофеев, Н.А. Ашпин, Я.М. Степанов, Г.А. Зинягин, А.Н. Макаров // Старый Оскол: ТНТ, 2024 — 324 с.

*А.В. Данченко, студ.;
рук. А.Р. Лепешкин, д.т.н., проф.,
М.А. Федин, д.т.н., проф.,
С.С. Кондрашов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОД НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СИЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Обычная система индукционного нагрева вращающихся дисков турбин состоит из нескольких плоских кольцевых индукторов [1], расположенных на разных радиусах диска, которая имеет следующие недостатки. Указанная система нагрева требует использования нескольких источников питания и соответственно повышенного электропотребления. Ее недостатком является также и невозможность получения дополнительной тепловой энергии за счет вращения, т.к. индукторы осесимметричны. Индукторы расположены дискретно по поверхности диска и поэтому появляются локальные отклонения температур $\pm 30\div 40^\circ\text{C}$ в радиальном направлении. Кроме того, установки индукционного нагрева отличаются высокой стоимостью, а для их электроснабжения требуется дополнительное оборудование. В связи с этим актуальна разработка новых энерго-сберегающих методов нагрева, которые снижают материальные затраты и позволяют экономить электроэнергию, в том числе, и разработка нового метода нагрева с применением сильных постоянных магнитов с улучшенными характеристиками, который представлен в данной работе.

С использованием разработанного метода на созданной экспериментальной установке с помощью тепловизора и датчика частоты вращения для бесконтактных измерений температуры и частоты вращения диска были проведены исследования нагрева и теплового состояния диска (из нержавеющей стали), вращающегося на разных частотах вращения в электромагнитном поле, созданном постоянными магнитами при разных величинах зазора между вращающимся диском и магнитами. В процессе исследований были получены экспериментальные данные и построены зависимости, которые сравнивались с результатами расчета в программе Elcut. Параметры теплового состояния диска зависят от частоты вращения диска (параметров электродвигателя), от расположения магнитов и их количества, от зазора между вращающимся диском и магнитами, а также от коэффициента теплоотдачи конвективного теплообмена в зоне нагрева вращающегося диска.

Литература

1. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: Монография. — М.: Инфра-М, 2024. 273 с.

Секция 28
ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ
И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ НАЗЕМНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
Electric propulsion and power supply
of ground vehicles

Председатель секции:

к.т.н., с.н.с. Глушенков Владимир Александрович

Секретарь секции: Саможей Ольга Станиславовна

А.Д. Турецкий, студ.; рук. Ю.В. Рашек, ст.препод. (НИУ «МЭИ»)

СМЕННЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БЛОКИ НА КОММЕРЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Развитие электротранспорта требует новых подходов к организации инфраструктуры, особенно для коммерческого транспорта, где эффективность эксплуатации играет ключевую роль. Одним из перспективных решений является использование сменных аккумуляторных блоков, позволяющих сократить время простоя транспортных средств на подзарядке и повысить общую производительность автопарка [1].

Применение сменных батарей актуально для автобусов, грузовиков и другого тяжелого городского транспорта, имеющих тяговый электропривод. Использование такого подхода позволяет решить проблему длительных перерывов на зарядку, обеспечивая быструю замену разряженных батарей новыми на специальных станциях обслуживания.

Проведенные исследования выявили следующие преимущества: сокращение временных потерь благодаря замене аккумулятора вместо его зарядки, увеличение продолжительности времени работы транспортного средства из-за устранения простоя на время зарядки, возможность постепенного обновления парка автомобилей на электромобили с использованием существующих технологий электропитания, улучшение экологической обстановки за счёт сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Для внедрения данной системы требуется модернизация существующего парка электромобилей путём установки соответствующих адаптеров для крепления сменных аккумуляторов, разработка единого стандарта интерфейсов взаимодействия и программного обеспечения управления процессом смены батареи, а также развитие сети специализированных зарядных комплексов и центров техобслуживания.

Таким образом, технология быстрой замены тягового аккумулятора представляет собой инновационное решение проблемы простоя коммерческих электромобилей для зарядки, способствует росту экологичности городской среды за счет минимального изменения существующей технологии работы при замещении электромобилями транспортных средств с ДВС и повышению экономической выгоды владельцев транспортных средств.

Литература

1. **Горев А.Э. Попова О.В.** Развитие городского пассажирского транспорта // Транспорт Российской Федерации № 2 (81) — 2019 — С. 45–47.

М.М. Валуев, студ.; В.Г. Комаров, к.т.н., с.н.с.

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЭЛЕКТРОСУДНА

Представлен пример модельно-ориентированного проектирования беспилотного электросудна на основе универсальной модульной среды системной интерпретации модели Элтро_Сим, создаваемой для всего жизненного цикла различных видов электрического транспорта. Архитектура среды основана на принципе полной взаимозаменяемости программных и аппаратных модулей системы на основе использования унифицированных программных и аппаратных интерфейсов. В этом случае любой компонент системы (устройства управления, мониторинга, интерфейса, электропривода) на разных этапах жизненного цикла изделия может быть взаимозаменён своим программным или физическим аналогом. При этом могут использоваться как программно генерируемые сигналы, так и сигналы реальных датчиков внешних воздействий и объекта управления.

Ключевой принцип — возможность адекватной замены любого модуля модели реальным узлом, и наоборот, без изменения структуры и интерфейса системы. Это позволяет использовать среду Элтро_Сим, как для виртуального моделирования, так и для испытаний и эксплуатации реального оборудования. Элтро_Сим платформенно-независима и не привязана к конкретному виду транспортных средств. Например, возможна замена модуля «мотор-винт» на модуль «мотор-колесо», что позволяет использовать единую логику для различных электротранспортных систем.

Среда использует сетевое распределённое управление и унифицированный графический интерфейс с минимальными требованиями к вычислительным ресурсам, что исключает избыточную сложность, характерную для тяжелых пакетов моделирования, таких как Matlab. Кроссплатформенность позволяет запускать Элтро_Сим на любом оборудовании, включая встроенные устройства. Для конкретной задачи подключаются только необходимые модули. Такой подход объединяет моделирование, программирование и физическую реализацию проектируемой системы в единую инженерную среду для исследования, разработки, конструирования, технологической подготовки производства и эксплуатации электротранспортных систем.

Литература

1. **Комаров В.Г., Глушенков В.А., Слепцов М.А.** Информационно-управляющие технологии жизненного цикла мультифункциональной магнитолевитационной транспортной системы «ЭЛТРО». УДК 621.3, ББК 31.2, Э — 455. Труды XVIII Международной Конференции «Электротехника, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты». М.: Знак, 2020, с. 160–166.

Д.С. Яценко, студ.; рук. О.С. Саможей, ст.препод. (НИУ «МЭИ»)

УСИЛЕНИЕ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ТРАМВАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Внедрение скоростного трамвая сопровождается значительным ростом энергопотребления из-за увеличения мощности подвижного состава и интенсивности движения. Это требует масштабной модернизации тяговых подстанций (ТП). Традиционный путь, заключающийся в замене преобразовательного оборудования и увеличении подводимой мощности, является капиталоемким и не всегда решает проблему пиковых нагрузок, вызывающих просадки напряжения в сети.

Перспективным направлением усиления ТП является интеграция с ними систем накопления энергии (СНЭ) — высокоомощных аккумуляторных батарей. Данное техническое решение позволяет решить несколько ключевых задач. Во-первых, СНЭ работают в режиме буфера, отдавая накопленную энергию в контактную сеть в моменты пикового потребления при разгоне нескольких трамваев одновременно. Это стабилизирует напряжение и снижает нагрузку на основное оборудование подстанции.

Во-вторых, в периоды низкой нагрузки или при рекуперативном торможении подвижного состава СНЭ аккумулируют избыточную энергию, которая в противном случае рассеивалась бы в виде тепла в тормозных резисторах. Это позволяет повысить общий КПД системы тягового электроснабжения до 15–20% и реализовать значительный энергосберегающий эффект.

Применение систем накопления энергии является гибким и масштабируемым решением. Оно не только откладывает необходимость дорогостоящей полной реконструкции подстанции, но и повышает надежность питания, обеспечивая возможность работы части маршрута в автономном режиме при кратковременных перерывах в электроснабжении. Таким образом, интеграция СНЭ представляет собой современный и экономически обоснованный этап усиления тяговых подстанций для питания скоростного городского электротранспорта.

Литература

1. **А.Н. Марикин, А.П. Самонин, В.Г. Жемчугов** Способы усиления тягового электроснабжения постоянного тока при интенсивном движении поездов // *Техника и технологии.* — 2003. — С. 123–127.

Е.А. Голиков, студ.; рук. М.В. Румянцев (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЁТ ТРОЛЛЕЙБУСА С НАКОПИТЕЛЕМ

К настоящему моменту довольно широкое распространение получили троллейбусы с увеличенным автономным ходом (ТУАХ), обладающие накопителями энергии на литий-ионных аккумуляторах (ЛИА). ТУАХ уверенно лидирует на российском рынке троллейбусов. Такая популярность ТУАХ объясняется, с одной стороны, наличием пригодных ЛИА для создания бортовых накопителей энергии [1] и, с другой стороны, универсальностью применения машин на городских дорогах и большой гибкостью построения маршрутов.

Номинальный («паспортный») автономный пробег ТУАХ в настоящее время определяется, в основном, желанием заказчика и составляет не менее 20 км. Однако, зачастую требуется гораздо больший пробег в режиме автономного хода. В данный момент верхняя граница автономного пробега для ТУАХ не определена и во многом диктуется пожеланиями заказчика, далеко не всегда обоснованными и компетентными. Этот факт позволяет считать актуальной проблему технического обоснования и, в конечном итоге, стандартизации верхней границы автономного пробега троллейбуса.

Нарращивание автономного пробега имеет некоторые ограничения: 1) время дозарядки накопителя с учётом максимальной мощности, получаемой из контактной сети; 2) масса накопителя и связанное с ней снижение пассажироместимости; 3) стоимость эксплуатации накопителя, с учётом того, что на данном этапе развития срок службы ЛИА в 2...3 раза ниже срока службы самого троллейбуса. Следует отметить, что ограничения 2) и 3) присущи в ещё большей степени и электробусу, однако такие машины должны эксплуатироваться вне троллейбусной инфраструктуры [2]. ТУАХ, напротив, позволяют наиболее полно использовать преимущества существующей контактной сети.

Данная работа содержит расчёт-обоснование максимального пробега троллейбуса в режиме автономного хода, и её результаты, возможно, послужат целям отраслевой стандартизации.

Литература

1. **Гольдес С.В.** Литий-ионный аккумулятор: от электрохимии и физики к устройству и эксплуатации. — М.: ООО «РЭНЕРА», 2025. — 124 с.
2. **Глушенков В.А., Румянцев М.В.** Концепция расчёта электрооборудования транспортных средств различного класса с гибридной силовой установкой. Вестник МЭИ. — 2016. — № 4, 2016 (74). — С. 69–75.

В.С. Шлапов, студ.; рук: В.Е. Осипов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОБУСОВ

В условиях стремительного роста городского пассажирского транспорта особое внимание уделяется экологически чистым и энергоэффективным решениям. Электробусы становятся ключевым элементом современной транспортной инфраструктуры, позволяя существенно снизить уровень выбросов, шумовое загрязнение и эксплуатационные затраты. Однако эффективность их применения напрямую зависит от надёжности и качества электроснабжения зарядных станций.

Проектирование тяговых подстанций для питания зарядных комплексов электробусов приобретает особую актуальность, поскольку переход на электротранспорт требует формирования новых подходов к распределению, преобразованию и управлению электроэнергией. Возрастающие нагрузки, необходимость обеспечения бесперебойной работы зарядных станций, интеграция с умными системами управления энергопотреблением и соблюдение требований энергоэффективности требуют тщательного технического обоснования и разработки современных инженерных решений.

Подготовительным этапом проектирования является анализ требований, включающий: определение мощности зарядных станций, изучение количества и типа электробусов (скоростная зарядка, ночная зарядка), учёт графика движения электробусов и пиковых нагрузок; Изучение нормативно-правовой базы: ГОСТ, ПУЭ, СНиП, согласно которым будет вестись проектирование. Также анализ включает учёт экологических и энергетических стандартов: выбор места размещения, близость к существующим электросетям и логистические задачи (удобство подключения электробусов).

В итоге, работа должна предложить обоснованные рекомендации по проектированию тяговых подстанций, обеспечивающих эффективное, надежное и экономически выгодное электроснабжение зарядных станций электробусов, способствуя развитию экологически чистого городского транспорта.

Литература

1. **Загайнов Н.А., Финкельштейн Б.С., Кривов Л.Л.** Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса: Учебник для техникумов / Под ред. Н.А. Загайнова — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1988. — 327 с.

*В.О. Карпушкин, студ.; В.Г. Комаров, к.т.н., доц.;
А.А. Бриедис, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Развитие электротранспорта и автономных робототехнических систем усиливает интерес к перспективным приводам, способным работать в условиях ограниченной массы, вибраций и нестабильных внешних факторов. Аэростатический электродвигатель, использующий принципы воздушной подушки или газодинамической стабилизации ротора [1], представляет собой вариант высокоэффективного бесконтактного привода. Его поведение определяется сложным взаимодействием электромагнитных, газодинамических и механических процессов, что делает имитационное моделирование ключевым инструментом разработки.

Цель моделирования — получение цифрового прототипа, позволяющего исследовать динамику ротора, распределение давления в газовой прослойке, электромагнитные нагрузки и тепловые режимы без проведения дорогостоящих экспериментов. Модель даёт возможность оптимизировать геометрию каналов подвода газа, параметры управляющего тока, конструкцию магнитной системы и алгоритмы регулирования.

Основные параметры модели: давление и расход рабочего газа, частота вращения, момент сопротивления, электромагнитные характеристики статора, тепловые потоки, геометрические размеры зазора. Основные переменные: мгновенное положение ротора, изменение зазора, колебания давления, ток в фазах, температура узлов. Совокупность этих переменных позволяет исследовать устойчивость работы при возмущениях, влияние перегрузок, вероятность касания ротора, переходные процессы при запуске и торможении.

Полученные результаты применяются для выбора конструктивных параметров, разработки алгоритмов управления, оценки ресурса и безопасности системы. Модель служит основой для цифровых испытаний, что сокращает количество натурных экспериментов, уменьшает затраты и ускоряет проектирование. Имитация позволяет выявлять потенциальные отказные состояния на раннем этапе, формируя основу для последующей сертификации и интеграции двигателя в состав беспилотных или маломерных транспортных средств.

Литература

1. **Котляренко С.Я., Кривошеев П.А.** Газодинамические подшипники и аэростатические опоры в электромеханических системах. // М.: Машиностроение 2015.

Н.А. Атрошенко, студ.;
рук. В.С. Гарбузюк, к.т.н., ст. преп.;
А.А. Бриедис, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В существующих электровозах ВЛ-10 и ВЛ-11 тяговые машины работают при последовательном возбуждении и управляются с помощью трёх группировок, что делает силовую схему сложной и ограничивает тяговые характеристики. Рекуперативное торможение осуществляется электромашинными преобразователями, обладающими значительной электрической инерционностью. Это приводит к недостаточно быстрой реакции на изменения напряжения контактной сети и вызывает риск перегрузок, срабатывания защит и прекращения рекуперации [1, 2].

Предлагается заменить последовательное возбуждение независимым возбуждением с питанием обмоток возбуждения от статических тиристорных преобразователей. Одновременно предлагается отказаться от одной из группировок тяговых машин, оставив только последовательную и параллельную. Такое решение значительно упрощает силовую схему, уменьшает количество переключаемых цепей и позволяет каждой секции электровоза работать автономно, что повышает надёжность локомотива.

Применение независимого возбуждения обеспечивает увеличение силы тяги примерно на 10% на малых скоростях и ещё более заметное улучшение характеристик на высоких скоростях. Это приводит к увеличению весовой нормы поездов, повышению пропускной и провозной способности железных дорог. Кроме того, улучшаются противобуксовочные свойства электровоза, а КПД тягового привода растёт благодаря отсутствию механических звеньев.

Использование статических преобразователей позволяет плавно изменять ток возбуждения при пуске и ослаблении поля. Это обеспечивает плавный разгон, снижает рывки и улучшает управляемость при различных режимах работы. При рекуперативном торможении тиристорные преобразователи дают возможность мгновенно уменьшать ток возбуждения при провалах напряжения контактной сети, что предотвращает броски тока якоря и исключает повреждение оборудования.

В результате модернизации силовых цепей электровозов ВЛ-10 и ВЛ-11 повышается надёжность, снижаются затраты на техническое обслуживание и ремонт, а расход энергии на тягу поездов уменьшается за счёт оптимизации режимов ведения поезда.

Литература

1. **Осипов С.И.** Основы тяги поездов. М.: УМК МПС России, 2000.
2. **Кикнадзе О.А.** Электровозы ВЛ-10 и ВЛ-10у М.: "Транспорт", 2001.

Ф.С. Быков, студ.; рук. М.В. Румянцев (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ ДЛЯ ТРОЛЛЕЙБУСА

В современной практике обязательным требованием к троллейбусам является низкое расположение пола. А в данный момент появляется тенденция и к упразднению трансмиссии, включающей карданную передачу. Поскольку такая компоновка тягового привода подразумевает размещение тягового электродвигателя (ТЭД) в малом объеме, становится актуальным вопрос о значительном повышении удельной мощности ТЭД [1].

Одним из решений этой задачи видится применение в тяговом приводе вентильно-индукторной машины (ВИМ), обладающего высокой удельной мощностью по сравнению с укоренившимся асинхронным двигателем. также, ВИМ имеет и другие преимущества: прост в изготовлении, имеет высокий КПД, возможность работы при высоких температурах и в агрессивной среде, также обладает естественной электромеханической характеристикой, оптимальной для применения в тяговом электроприводе [2].

В данной работе рассматривается схема повышения удельной мощности ВИМ. Как прототип берется классическая схема с 3-х фазной ВИМ и добавляются две обратные фазные обмотки. По сравнению с прототипом, заявленная ВИМ имеет более высокий уровень энергетической эффективности, так как содержит 5-фазную обмотку статора. Кроме того, у 5-фазной машины снижается уровень пульсаций электромагнитного момента, что стабилизирует частоту вращения ротора. Проводится расчет 3-х и 5-и фазной машины для получения основных характеристик для дальнейшего сравнения.

Расчёты показывают, что 5-и фазная ВИМ обладает удельной мощностью, большей на 55...60% по сравнению с обычной машиной. Также имеется возможность наращивания мощности за счёт увеличения количества витков обмоток.

Литература

1. **Глушенков В.А., Румянцев М.В.** Концепция расчёта электрооборудования транспортных средств различного класса с гибридной силовой установкой. Вестник МЭИ. — 2016. — № 4, 2016 (74). — С. 69–75.
2. **Бирюков В.В.** Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава: учебник. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. — 328 с.

*М.С. Богданов, студ.;
рук. Р.М. Девликамов, к.т.н., доц.,
А.А. Бриедис, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) в тяговом приводе актуально, так как он обладает высокой ремонтпригодностью и дает возможность создания принципиально нового и конкурентоспособного электроподвижного состава.

Преимущества ВИД: высокая надежность, более высокий КПД, по сравнению с асинхронной тяговой машиной (АТМ), возможность работы при высоких температурах и в агрессивной среде, оптимальная естественная механическая характеристика для применения в тяговом электроприводе, простота в изготовлении [1].

В работе рассматривается схема с повышенной удельной мощностью вентильно-индукторной машины. Как прототип берется классическая схема с 3-х фазной вентильно-индукторной машиной и добавляется две обратные фазные обмотки. По сравнению с прототипом, заявленный ВИД имеет более высокий уровень энергетической эффективности, так как содержит 5-фазную обмотку статора. Кроме того, у 5-фазной машины снижается уровень пульсаций электромагнитного момента и стабилизируют частоту вращения ротора. Проводится расчет 3-х и 5-и фазной машины для получения основных характеристик для дальнейшего анализа.

В результате анализа мощность 5-и фазного ВИД выше на 13%, он легче на 50%, а удельная мощность выше на 57,4%. Также возможно дальнейшее увеличение количества обмоток.

Литература

1. **Калинин В.К.** Электровозы и электропоезда. М.: Транспорт, 1991.

Д.С. Вислогузов, студ.;
рук. М.В. Румянцев, ст.препод. (НИУ «МЭИ»)

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

Стремительная электрификация автомобилей открыла перед производителями и пользователями автотранспортных средств (АТС) широкий выбор схем и компоновок тягового привода, имеющего признаки гибридного, комбинированного или полностью электрического [1]. Развитие техники на современном этапе, имеющееся многообразие элементной базы позволило применить довольно широкий спектр технических решений, а с другой стороны — вновь актуализировало вопрос оптимизации параметров комбинированного тягового привода.

Условия эксплуатации определяют оптимальные соотношения механической и электрической мощностей на каждом этапе ездового цикла [2]. Используя эти соотношения, разработчик предлагает ту или иную схему построения тягового привода: параллельную, последовательную или комбинированную, с заданной степенью параллельности. Под степенью параллельности понимается отношение электрической (вырабатываемой электрохимическим источником) мощности к механической, вырабатываемой тепловым двигателем.

Так, полностью электрифицированное АТС — электромобиль — во всех режимах имеет степень параллельности, равную бесконечности. Традиционное АТС, напротив, имеет степень параллельности, равную нулю. Степень параллельности гибридного автомобиля с последовательной или параллельной схемой тягового привода зависит от мощностей электрохимического накопителя (буфера) и теплового двигателя в конкретном режиме (точке) ездового цикла. В режиме долгой монотонной езды степень параллельности стремится к нулю, тогда как в «рваном» цикле, изобилующем разгонами и торможениями, степень параллельности высока.

В данной работе предлагается построение и описание алгоритма расчёта ключевого параметра энергосиловой установки (ЭСУ) — степени параллельности и её влияние на компоновочные решения для заданных условий эксплуатации.

Литература

1. **Энтони Джутон, Ксавье Рейн, Валери Совант-Мойно, Франсуа Орсини, Кристель Сабер, Седдик Бача, Оливье Бету, Эрик Лабуре.** Электромобиль: устройство, принцип работы, инфраструктура / пер. с франц. В.И. Петровичева. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 440 с.
2. **Глушенков В.А., Румянцев М.В.** Концепция расчёта электрооборудования транспортных средств различного класса с гибридной силовой установкой. Вестник МЭИ. — 2016. — № 4, 2016 (74). — С. 69–75.

А.А. Васюков, студ.;
рук. В.Г. Комаров, к.т.н., доц.;
А.А. Бриедис, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

БЕСПИЛОТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАГЛЕВ-ЭЛТРО

В работе рассматривается подход к созданию беспилотной системы управления для перспективного транспортного комплекса MAGLEV-ELTRO, основанного на технологии магнитной левитации, разрабатывается архитектура и алгоритмы управления. Актуальность исследования обусловлена развитием высокоскоростных и экологических транспортных решений, где автономное управление повышает безопасность, снижает нагрузку на обслуживающий персонал и обеспечивает энергоэффективность движения [1, 2].

Предлагаемая система строится как многоуровневая структура. На нижнем уровне реализуется высокочастотная стабилизация зазора между подвижным составом и направляющей с помощью быстродействующих регуляторов, обеспечивающих подавление вибраций и устойчивость при внешних возмущениях. Средний уровень отвечает за тягово-тормозные режимы. На верхнем уровне функционируют элементы автономного управления: оценка состояния трассы, прогнозирование траектории, предотвращение столкновений и принятие решений о маневрировании.

Методически работа опирается на совмещение классических методов регулирования (PID, робастные и адаптивные регуляторы) с современными интеллектуальными подходами, основанными на машинном обучении. Такая гибридная схема позволяет обеспечить требуемую точность стабилизации при сохранении гибкости автономного управления [3].

Полученные результаты демонстрируют, что интеграция автономных алгоритмов управления в систему MAGLEV-ELTRO позволяет улучшить устойчивость движения, повысить энергоэффективность и расширить функциональные возможности транспортного комплекса. Разработанный подход может быть использован в проектах городского и высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

Литература

1. **Клюев В.В., Храмшин Т.Р.** Электромагнитные системы транспортных установок: модели и управление. // М.: Инфра-Инж, 2021.
2. **Зайцев И.В., Погорелов А.И.** Системы автоматического управления транспортными объектами. // СПб.: Питер, 2020.
3. **Афанасьев А.Н., Сарычев В.А.** Автоматизация и роботизация железнодорожного транспорта. // М.: ФГБОУ РУТ (МИИТ), 2019.

Направление V

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Technosphere safety

Руководитель направления:

Заведующий кафедрой

инженерной экологии

и охраны труда НИУ «МЭИ»

д.т.н., профессор

Кондратьева Ольга Евгеньевна

Секция 29

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Technosphere safety

Председатель секции: д.т.н., профессор Кондратьева Ольга Евгеньевна

Секретарь секции: к.т.н., доцент Локтионов Олег Александрович

А.Р. Гусев, студ.;

рук. Ю.В. Гусева, к.ф.-м.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

ПРОСКОК ЗОЛЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В АППАРАТАХ ГАЗООЧИСТКИ ТЭС

Повышение экологической безопасности эксплуатации топлив, сжигающих установок тепловых электрических станций основано на реализации принципов технологического нормирования выбросов вредных загрязняющих веществ в соответствии с новым законодательством [1]. В отечественной электроэнергетике доля энергии, производимая за счет сжигания угольного топлива (бурый и каменный уголь, антрацит) достигает 23–24%. При этом в результате горения угля образуется золошлаковые отходы в объеме порядка 20–25 млн. тонн в год. В России в эксплуатации находится порядка 200 электрических фильтров, обеспечивающих значительное снижение выбросов золы твердого топлива в атмосферу. Эффективность задержки твердых частиц в указанных аппаратах газоочистки достигает в среднем 97–98%, а для электрофильтров с керамическими электродами может составлять до 99,9%. В данных условиях величина проскока твердых частиц находится в широких пределах от 0,1 до 3%. Важно отметить, что на величину проскока оказывает величина конструктивное наполнение коронирующих, и в большей мере, осадительных электродов, кроме того, эксплуатационные величины электрофизических параметров могут иметь определяющее значение. В этой связи, целью работы является повышение эффективности работы аппаратов газоочистки на основе разработки методики оценки величины проскока частиц золы твердого топлива с учетом влияния эксплуатационных факторов.

Автором разработана методика расчета величины проскока золы твердого топлива в электрофильтрах тепловых электрических станциях. Определены значения проскока золы по зонам полей газоочистных аппаратов. Разработаны рекомендации по улучшению работы электрофильтрационных аппаратов системы газоочистки.

Полученные результаты исследования могут быть использованы энергетическими предприятиями для повышения экологической безопасности топлива сжигающих установок.

Литература

1. **Федеральный закон РФ от 26.07.2019 № 195-ФЗ** «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха» [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329955/ (дата обращения 16.11.2025).

А.Р. Гусев, студ.;

рук. Ю.В. Гусева, к. ф. -м.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ЗОЛЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Современные требования отечественного природоохранного законодательства определяют принципы Государственного подхода к технологическому нормированию выбросов вредных (загрязняющих) веществ. К маркерным веществам при сжигании природного газа относятся оксиды азота (в перерасчете на NO_2), оксид углерода (CO), а в условиях горения мазута и угля дополнительно контролируется в продуктах сгорания диоксид серы (SO_2) и зола твердого топлива [1].

Новые принципы регулирования выбросов в атмосферу от предприятий энергетики регламентируют установление технологических нормативов и показателей выбросов маркерных веществ. В отношении снижения выбросов золы твердого топлива наибольший интерес представляет угольное топливо с высокой зольностью. Однако, уменьшение зольности на стадии подготовки топлива к сжиганию представляет сложную и капиталозатратную задачу. Поэтому, обеспечение нормативных значений выбросов маркерных веществ осуществляется при помощи различных аппаратов газоочистки (скрубберы Вентури, электрофильтры, рукавные фильтры, комбинированные фильтры). В этой связи, целью работы является расчетная оценка содержания и массовых выбросов золы твердого топлива в продуктах сгорания различных марок высокозольного топлива для обоснования выбора аппаратов газоочистки.

В работе выполнены расчеты концентрации золы твердого топлива в дымовых газах котлов тепловых электрических станций. Определены массовые выбросы золы твердого топлива и требуемые степени задержки твердых частиц в аппаратах газоочистки. Показано, что на эффективность работы системы газоочистки значительное влияние оказывают влажность и диэлектрическая проницаемость золы твердого топлива.

Полученные результаты исследования могут быть использованы энергетическими предприятиями для разработки программы экологической эффективности и экологической отчетности ТЭС.

Литература

1. **Федеральный закон РФ от 26.07.2019 № 195-ФЗ «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха»** [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329955/ (дата обращения 05.11.2025).

А.Р. Гусев, студ.;

рук. Ю.В. Гусева, к. ф. -м.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗОЛЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ

Улучшение эксплуатационных характеристик аппаратов газоочистки на энергетических предприятиях направлено на повышение экологической безопасности функционирования топливосжигающих установок. В этой связи, учитывая потребление топлива и его теплотехнические характеристики, особое внимание привлекает уголь. При сжигании угольного топлива (бурый, каменный уголь, антрацит) образуется зола твердого топлива. В условиях сжигания высокозольных углей $1,4 \leq A^{пр} \leq 2,5\% / (\text{МДж/кг})$ концентрация золы твердого топлива в продуктах сгорания находится в пределах $50\text{--}70 \text{ г/м}^3$. Для обеспечения требуемого содержания золы твердого топлива после газоочистки необходимо, чтобы степень задержки твердых частиц составляла не менее $99,95\text{--}99,99\%$, которую в условиях эксплуатации действующего оборудования достичь сложно. Отметим, что на эффективность работы аппаратов газоочистки влияют электрофизические свойства золы твердого топлива. В этой связи, целью работы является оценка влияния электрофизических свойств золы твердого топлива на эффективность их задержки в электрофильтрах [1].

В работе выполнен детальный анализ влияния состава и свойств золы на ее диэлектрическую проницаемость. Расчеты проведены для различного состава золы, наиболее распространенного для отечественных угольных электростанций. По результатам расчетной оценки выполнено определение степени задержки золы твердого топлива в электрофильтре в сравнении с усредненными значениями диэлектрической проницаемости, применяемыми в расчетной практике при подготовке экологической отчетности ТЭС.

Полученные результаты исследования могут быть использованы энергетическими предприятиями при реализации на производстве принципов технологического нормирования загрязняющих атмосферу вредных выбросов маркерных веществ и разработке программ повышения экологической эффективности тепловых электрических станций.

Литература

1. **Федеральный закон РФ от 26.07.2019 № 195-ФЗ «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха»** [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329955/ (дата обращения 15.11.2025).

Д.А. Остяков, студ.; рук. Е.В. Федорова, к.м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА НАРУШЕНИЯ РЕПРОДУКТИВНОЙ ФУНКЦИИ РАБОТНИКОВ

Цель исследования — анализ и систематизация методов оценки профессиональных рисков для репродуктивного здоровья применительно к различным отраслям промышленности. Для комплексной оценки и управления данными рисками проанализированы методы, регламентированные Приказом Минтруда № 926н и Р 2.2.3969-23.

Для первичного скрининга рекомендованы качественные методы. Контрольные листы позволяют быстро идентифицировать наличие репротоксикантов, ионизирующего излучения, шума свыше 80 дБА и других ВПФ/ОПФ. Однако они лишь констатируют наличие опасности [1].

Наиболее распространен в практике полуколичественный матричный метод, где риск R определяется как произведение вероятности P и тяжести последствий S . Для репродуктивных рисков бесплодие и врожденные патологии оцениваются как катастрофические последствия ($S=5$). Вероятность определяется по уровню превышения ПДК/ПДУ. Метод обеспечивает наглядность и ранжирование рисков, но обладает субъективностью [1].

Наиболее объективную количественную оценку предоставляет метод на основе СОУТ и Р 2.2.3969-23, учитывающий класс условий труда, стаж работы и зависимость «доза-эффект», но имеющий недостатки в идентификации риска, в силу ограничений в самой методике СОУТ [2].

Для визуализации путей реализации риска эффективен анализ «галстук-бабочка», показывающий барьеры между причинами и последствиями [1].

Выбор метода зависит от целей оценки: для экспресс-анализа — чек-листы, для приоритизации — матричный метод, для точной количественной оценки — метод на основе СОУТ. Комплексное применение этих методов позволяет создать эффективную систему управления репродуктивными рисками.

Литература

1. **Приказ Минтруда России от 28.12.2021 № 926** «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков».
2. **Р 2.2.3969-23. 2.2. Гигиена труда. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. Руководство.** — М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023.

Ю.М. Катин, студ.; рук. И.В. Королев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДУГИ НА ПЕРСОНАЛ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Целью данной работы является исследование проблемы защиты человека от воздействия электрической дуги, рассмотрение соответствующей нормативной документации и разработка рекомендаций по ее изменению.

Подход к средствам индивидуальной защиты (СИЗ) от электрической дуги в Российской Федерации и за рубежом сильно различается. В частности, это касается защищаемых зон. В западных странах особый акцент делают на защиту головы и рук, так как они чаще всего подвергаются воздействию дуги, а поражение головы к тому же является еще и наиболее опасным [1]. В России же по большому счету защищается все тело. Важным фактором, влияющим на безопасность при дуговых воздействиях, является учёт конструкции электроустановок и выявление наиболее опасных установок.

Для наиболее полного изучения вопроса защиты от дуги также необходимо детальное изучение ее воздействия на человека, и факторов, на него влияющих. Наибольшим и опаснейшим воздействием дуги на человека является тепловой [1]. Исходя из этого, определяются основные показатели и параметры дуги, и на этом же будет сфокусирована данная работа. Наиболее важными параметрами дуги являются: граница дуговой вспышки (AFB , мм), дуговой ток (I_{arc}), падающая энергия дуги (E , Дж/см²) [2]. Очень большое влияние на образование дуги в электроустановке оказывает расположение электродов.

В работе проводится анализ рабочего места, конструкции электроустановки и условий работы электротехнического персонала, методики расчета зоны электродугового термического воздействия (ЗЭТВ) с помощью различных программ, на разных напряжениях (1000 В и выше), а также проводится расчет ЗЭТВ на примере опасной электроустановки.

Литература

1. **International Social Security Association.** Guideline for the selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc. 2nd Edition, 2011. Section for Electricity, Gas and Water c/o Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse Gustav-Heinemann-Ufer 130, D-50968 Köln, Germany.
2. **IEEE Std 1584™-2018.** IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations — The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.

В.Е. Кузин, студ.; рук. И.В. Королев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ НА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Целью данной работы является анализ специфических опасностей при работах на контактной сети электрифицированных железных дорог, оценка действующих нормативных требований и разработка практических рекомендаций по повышению уровня электробезопасности персонала.

Подход к организации безопасности работ на контактной сети (КС) имеет критически важные отличия от работ в стационарных электроустановках, обусловленные пространственным разбросом, высотным расположением оборудования и постоянным воздействием внешних факторов (атмосферные осадки, ветровые нагрузки, вибрация) [1]. Ключевыми рисками, помимо поражения электрическим током, являются падение с высоты и термическое воздействие электрической дуги, возникающей при коротких замыканиях или ошибочных операциях. Существующая нормативная база [2] требует дополнения и детализации в части риск-ориентированного подхода для различных типовых работ (монтаж, ремонт, очистка изоляторов).

Для формирования эффективных защитных мероприятий необходим детальный анализ сценариев возникновения аварийных ситуаций. Наибольшую опасность представляет комбинация факторов: высотные работы при невозможности быстрого отключения напряжения на смежных участках КС. В связи с этим, определяющими параметрами для оценки опасности являются: уровень рабочего напряжения, ток короткого замыкания в точке работ, время срабатывания релейной защиты, а также условия образования электрической дуги.

В работе проводится классификация видов работ на КС, анализ типовых нарушений и инцидентов, оценка эффективности применяемых средств защиты (диэлектрические штанги, перчатки, экранирующие комплекты) и организационных мероприятий (наряды-допуски, распоряжения). На основе моделирования опасных ситуаций и расчетов зон термического воздействия дуги разрабатываются конкретные рекомендации по совершенствованию инструкций и применению дополнительных средств индивидуальной и коллективной защиты.

Литература

1. Правила техники безопасности при эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог и устройств электроснабжения автономных тяговых подвижных составов. — М.: Транспорт, 2021.
2. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПОТЭЭ). — М.: НП ЭНАС, 2023.

И.А. Белошицкая, студ.; рук. Ю.Н. Бурвикова, к.х.н. (НИУ «МЭИ»)

МОНИТОРИНГ ВЫБРОСОВ ОТ ПОЛИГОНА ТКО С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

По данным Росприроднадзора за 2024 год, предприятия, занимающиеся сбором, обработкой и утилизацией отходов, обработкой вторичного сырья, выбросили в атмосферу около 700 тыс. тонн загрязняющих веществ из неорганизованных источников. При этом системы автоматического контроля выбросов на полигонах ТКО на сегодняшний момент не применяются, а расчетные методы не всегда дают полную картину.

Один из основных видов выбросов полигона — свалочный газ, смесь различных газов, образующаяся в результате процессов аэробного и анаэробного разложения отходов. По объёму он обычно содержит 45–60% CH_4 , 40–60% CO_2 и 2–9% других газов [1]. Применяющейся сегодня методике расчета выбросов на полигонах ТКО более 20 лет, однако компонентный состав самих отходов с тех пор изменился, что могло повлечь за собой изменение состава свалочного газа [2, 3]. Кроме того, при помощи расчетных методов нельзя отслеживать состояние полигона или заметить крупный аварийный выброс.

Предлагается использовать систему автоматического контроля, на базе спектральных методов измерения. ИК-Фурье спектрометры дают возможность идентифицировать широкий спектр веществ и с высокой точностью различать компоненты одной смеси даже при малых концентрациях [4]. Система автоматического контроля позволит отслеживать работу полигона ТКО и предупреждать аварийные ситуации.

Литература

1. ATSDR, (2001), Landfill Gas Primer — An Overview for Environmental Health Professionals, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), Division of Health Assessment and Consultation, 2001, URL: <http://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch2.html> (дата обращения 02.05.2025)
2. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов (издание дополненное и переработанное) // НПП «ЭКОПРОМ»; АКХ им. К.Д. Памфилова; НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина; НИИ АТМОСФЕРА; НПП «ЛОГУС». — М., 2004 год.
3. **Никанорова А.А., Лебедев Д.А., Никаноров П.А., Пименов А.Н., Венцюлис Л.С.** Перспективы извлечения вторичных материальных ресурсов из ТКО в Ленинградской области // Региональная экология. 2019. № 2 (56). С. 72–85. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-72-85 EDN: UAEUJC
4. **Бёккер Ю.** Спектроскопия / Ю. Бёккер ; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. — Москва : Техносфера, 2009. — 527 с. — (Мир химии ; т. 4 (11)). — ISBN 978-5-94836-220-5

И.Р. Мишин, студ.; рук. И.В. Королёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Электротравмы на промышленных предприятиях остаются одной из наиболее острых причин производственного травматизма ввиду высокой тяжести последствий. Следовательно, необходим комплексный подход к повышению электробезопасности, как на уровне организационных мероприятий, так и при разработке технических решений. В связи с этим необходима комплексная оценка и последующая разработка мероприятий для предотвращения электротравматизма [1, 2].

В рамках проведённой работы были исследованы основные причины электротравм на производственных предприятиях и проанализированы типичные недостатки в проектировании и эксплуатации систем электроснабжения. Основными причинами электротравм являются: неправильная организация работ, недостаточная компетентность персонала, отсутствие или пренебрежение средствами индивидуальной защиты, халатность в эксплуатации электрохозяйства или неверный подбор электрооборудования на стадии проектирования. Основными техническими причинами являются: неэффективность систем заземления и уравнивания потенциалов, отсутствие надлежащего мониторинга изоляции кабельных сетей и электрооборудования, неверный выбор аппаратов защиты.

Предложенный комплекс технических мероприятий по повышению электробезопасности включает следующие направления: совершенствование проектных решений по заземлению и уравниванию потенциалов с целью снижения напряжений прикосновения и потенциалов на оборудовании, переоснащение аппаратов защиты устройствами с надлежащей чувствительностью, обеспечивающих своевременное отключение при возникновении аварийных ситуаций, организацию периодического контроля состояния изоляции оборудования и кабельных линий. Использование предложенных мер в системах электроснабжения производственных предприятий позволит существенно снизить риск поражения электрическим током персонала и повысить надёжность функционирования электрооборудования.

Литература

1. **Бобков Н.И.** Электробезопасность персонала на производстве: острые проблемы и пути решения // Безопасность в техносфере. 2024. № 4.
2. **Волков О.А., Львов А.В.** Анализ причин электротравм и их профилактики // Охрана труда на производстве. 2024. Т. 9.

А.И. Копейко, студ.; рук. М.А. Забелин, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПАО «РОССЕТИ»

ПАО «Россети» является одной из крупнейших электросетевых компаний в мире, обеспечивающей передачу и распределение электроэнергии в 82 регионах страны. Основная миссия компании заключается в обеспечении надежного, качественного и доступного энергоснабжения, что является критически важным аспектом для комфорта миллионов людей. Компания управляет инфраструктурой, включающей 2,57 млн км линий электропередачи, 593 тыс. электрических подстанций с общей мощностью 886 ГВА. В состав группы входит 45 дочерних и зависимых общества, в предприятии работает более 234 тыс. сотрудников. Более 80% всей вырабатываемой в стране электроэнергии (более 900 млрд кВт*ч) передается по сетям Группы «Россети».

Анализ технического состояния электросетевой инфраструктуры ПАО «Россети» выявил высокую степень физического износа оборудования: средний общий уровень износа по филиалам составляет 70,1%, что указывает на «неудовлетворительное состояние» технического актива, при этом в отдельных регионах он достигает 78–84% (например, филиалы «Северный Кавказ», «Сибирь»). Наиболее критическая ситуация наблюдается с воздушными линиями электропередачи 35–220 кВ, средний износ которых превышает 86%, что говорит о «критическом состоянии» оборудования. Такой масштабный износ инфраструктуры, находящейся в разных природно-климатических зонах, многократно увеличивает её уязвимость: в сочетании с воздействием климатических факторов (гололёдообразование, ветровые нагрузки, экстремальные температуры) создает существенные риски для надёжности электроснабжения. В частности, деградация механической прочности опор и проводов ВЛ в сочетании с ветровыми и гололедными нагрузками может привести к их обрушению, а перегруженное и перегретое трансформаторное оборудование в период аномальной жары — к выходу из строя. Таким образом, накопленный уровень физического износа является ключевым фактором, усугубляющим климатические риски, и требует учёта при разработке мер и инвестиционных программ для обеспечения надёжности ЕЭС.

Литература

1. ПАО «Россети». Годовой отчёт за 2024 год [Электронный ресурс] — 2025.
2. Забелин М.А., Клименко В.В., Локтионов О.А. Оценка работоспособности и причин аварийности объектов электросетевого комплекса севера европейской части России // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2024. — № 3. — С. 3–21.

Д.В. Евстигнеев, студ.;
рук. Ю.Н. Бурвикова, к.х.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОНИТОРИНГ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПЫЛИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

Обеспечение здоровья и благополучия населения — важная задача, приведённая в списке семнадцати целей устойчивого развития (ЦУР), установленных ООН. Из-за активной индустриализации появляется всё больше процессов антропогенного характера, приводящих к загрязнению литосферы, гидросферы и атмосферы.

Одними из наиболее изученных загрязнителей атмосферного воздуха (АВ) и в то же время опасных с точки зрения воздействия на здоровье человека являются мелкодисперсные взвешенные частицы PM_{2,5} и PM₁₀ (от англ. particulate matter — взвешенные частицы), соответствующие диапазонам эквивалентных диаметров меньше 2,5 мкм и меньше 10 мкм соответственно. Данные частицы определены ВОЗ как приоритетные загрязняющие вещества (ЗВ); при этом опасны как сами частицы, повреждающие альвеолярную систему механическим путём, так и сорбированные на их поверхности соединения. Наиболее часто встречаются такие загрязнители, как тяжёлые металлы, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), летучие органические соединения (ЛОС) [1].

Последствия воздействия PM_{2,5} и PM₁₀ включают развитие сердечно-сосудистых заболеваний, таких как ишемическая болезнь сердца, атеросклероз, инфаркт и инсульт, онкологических заболеваний (из наиболее частых можно выделить рак лёгких), метилирование ДНК [2, 3].

Мониторинг химического состава PM_{2,5} и PM₁₀ является сложной задачей ввиду малых значений концентраций ЗВ на поверхности частиц. В связи с этим возникает необходимость в предложении усовершенствованной методики, позволяющей с большей точностью определить химический состав в части концентрации ПАУ, тяжёлых металлов и ЛОС.

Литература

1. **Янин Е.П.** Роль промышленной пыли в формировании общего состава и физико-химических свойств городских почв // *Экологическая экспертиза*, 2015, № 3, с. 53–76.
2. **Чаулин А.М., Сергеев А.К.** Современные представления о роли мелкодисперсных частиц PM_{2,5} в развитии атеросклероза и повреждении миокарда: эпидемиологические и патогенетические аспекты. — Самара, 2022. — 17 с.
3. **Wang C., O'Brien K. M., Xu Z., Sandler D. P., Taylor J. A., & Weinberg C.R.** Long-term ambient fine particulate matter and DNA methylation in inflammation pathways: results from the Sister Study. *Epigenetics*. 2019, 1–12. DOI: 10.1080/15592294.2019.1699894

Д.О. Мороз, студ.; рук. А.В. Мордвинова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЭСКАЛАЦИИ ПОЖАРА ПО ДАННЫМ АВАРИЙНОСТИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Эскалация пожара существенно усугубляет последствия возгораний, что требует углубленного анализа причин их возникновения и разработки превентивных мер. Целью исследования является — выявление и анализ ключевых факторов, способствующих эскалации пожаров на производственных объектах, для разработки эффективных мер по предотвращению крупных аварий.

В качестве статистического исследования был проведен анализ данных о пожарах на производственных объектах, смоделированы различные сценарии развития пожара, изучены нормативные документы и определены наиболее распространенные факторы, способствующие эскалации пожаров: нарушение требований пожарной безопасности, неправильный подбор оборудования и материалов, отсутствие или неэффективность систем пожаротушения [1].

Анализ влияния опасных факторов пожара показывает высокий потенциал эскалации и быстрого распространения огня во всех сценариях. Это приводит к увеличению числа пострадавших и разрушений из-за сложного взаимодействия нескольких факторов — каждый сценарий пожара (пролив жидкости, горение твердых материалов, сгорание газозоогазных смесей) сопровождается комплексом поражающих факторов: пламенем, искрами, тепловым излучением, задымлением и токсичными продуктами горения [2].

Разные сценарии имеют уникальные поражающие факторы: сгорание газозоогазной смеси создаёт избыточное давление и ударную волну, струйное горение концентрирует тепловое воздействие.

Комплексный подход к пожарной безопасности — ключевой фактор минимизации рисков. Необходимо учитывать не только вероятность возникновения пожара, но и последствия его развития с учётом взаимодействия всех опасных факторов. Предотвращение эскалации пожара требует системного подхода [2], включающего совершенствование нормативно-правовой базы, повышение уровня подготовки персонала, внедрение современных систем пожарной безопасности.

Литература

1. **Абрамов С.А.** Пожарная безопасность производственных объектов. М: Академия ГПС МЧС РФ, 2022. — С. 316.
2. **Баратов А.Н.** Горение и пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. М: Мир, 2020. — С. 125.

А.В. Дедулин, Д.С. Егоров, Д.А. Матюк, студ.;
рук. И.И. Дорофеев, доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВНЕДРЕНИЯ УЧЕБНОГО МОДУЛЯ «ОХРАНА ТРУДА» ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РАБОТНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Современные условия на рынке труда Российской Федерации создают для образовательных организаций высшего и средне-профессионального образования новые условия и требования по подготовке квалифицированных специалистов технических специальностей. Для эффективной подготовки конкурентно-способного специалиста, необходимо в период подготовки (обучения) применять современные и качественные методы, например, обучение по когнитивной технологии или применение модели социально-профессионального развития [1, 2].

Актуальным вопросом при подготовке студентов к будущей профессиональной деятельности является обучение действующим требованиям и современным тенденциям развития «Охраны труда». Теоретический блок существующих программ обучения студентов технических специальностей направлен на формирование общего представления и умение пользоваться информацией, изложенной в ФЗ и НПА. Отсутствие в программе обучения практического блока, основанного на опыте крупных компаний топливно-энергетического комплекса, не позволяет в полной мере сформировать у обучаемого ключевые практические навыки для профессиональной деятельности, а именно: поиск истины, анализ и проектирование своей деятельности, поиск правильных действий в условиях неопределенности и др. [1, 2].

В работе рассмотрен вопрос создания эффективного учебного модуля «Охрана труда» для подготовки работников электроэнергетической отрасли, основанный на практических знаниях крупного предприятия Самарской области, состоящий из теоретического и практического блоков, позволяющих сформировать у обучающихся необходимые профессиональные компетенции, навыки и знания.

Литература

1. **Нагорнова, А.Ю.** Характеристика когнитивной технологии обучения студентов технических специальностей / А.Ю. Нагорнова, Ю.С. Нагорнов, Д. В. Кирюхина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — С. 327. — EDN RPIKVL.
2. **Зеер, Э.Ф.** Инновационная модель социально-профессионального развития личности обучающегося / Э.Ф. Зеер, В.С. Третьякова, М.В. Зиннатова // Образование и наука. — 2020. — Т. 22, № 3. — С. 83–115. — DOI 10.17853/1994-5639-2020-3-83-115. — EDN UIQSRV.

*Р.Р. Иксанова, Э.А. Тюгаева, студенты; рук. И.И. Дорофеев, доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске)*

ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОФИКСАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Ежегодно в Российской Федерации происходят десятки несчастных случаев со смертельным исходом, произошедших при эксплуатации энергоустановок. Наибольшее число смертельных случаев происходит на объектах электрических сетей и на электроустановках потребителей, в связи с чем возникает потребность в разработке мероприятий, направленных на обеспечение соответствующего уровня электробезопасности [1].

Изначально на объектах электросетевого комплекса применялась система видеонаблюдения, предназначенная для удаленного контроля за состоянием коммутационного оборудования и выполнения требований по охране труда при производстве работ и оперативных переключениях, но развитие современных технологий и средств видеофиксации позволяют организовать мониторинг за действиями персонала и происходящей окружающей обстановкой в режиме реального времени от первого лица [2].

Учитывая, что внедрение новых методик и процессов организации видеофиксации формируют дополнительную нагрузку на персонал («Работники-Исполнители», «Работники-Контролеры», «Специалисты по ОТ», «Руководители»), необходимо предусматривать дополнительные мероприятия, направленные на вовлечение персонала и на автоматизацию анализа собранных данных (применение искусственного интеллекта).

В работе рассмотрен вопрос создания системы видеофиксации и видеонаблюдения при эксплуатации электрооборудования и электроустановок, позволяющей своевременно реагировать на угрозы для жизни и здоровья персонала, обеспечить безопасную эксплуатацию электрооборудования, а также произвести оценки действий персонала при возникновении нештатных ситуаций.

Литература

1. Информация о несчастных случаях со смертельным исходом, произошедших при эксплуатации энергоустановок организаций, подконтрольных органам Ростехнадзора, за 2024 год. — URL: http://pech.gosnadzor.ru/info/nesc_sluch/2024.12_ns_en.pdf (дата обращения: 14.11.2025). — Текст: электронный.
2. **Абрамченко А., Апросин К., Чирков Ю.** Применение системы видеофиксации в составе систем технологического видеонаблюдения на объектах электроэнергетики — Ежеквартальный спецвыпуск № 1(12) — Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск «Россети», 2019. — 7 с.

А.А. Дубоносов, студ.;
рук. А.В. Мордвинова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ТОПЛИВА

Котельные установки являются объектами повышенной пожарной опасности, риск на которых в значительной степени определяется физико-химическими свойствами используемого энергоносителя. Проведение сравнительного анализа позволяет разработать противопожарные мероприятия для котельных на различном топливе — природном газе, мазуте и твердом топливе [1].

Основными факторами пожарной опасности для газовых котельных являются утечки газа и образование взрывоопасных газозвудушных смесей. Для мазутных котельных ключевые риски связаны с разливом мазута, его воспламенением при утечке наличия источника зажигания, а также образованием взрывоопасных концентраций паров в воздухе. Наибольшее число возгораний характерно для котельных на твердом топливе, где опасность представляют тлеющая пыль, которая может стать источником зажигания для пылевоздушной смеси, что приводит к взрыву, искры от топочных устройств и перегрев оборудования [2]. Согласно исследованиям, риск возникновения пожара в газовых котельных, хотя и обладает высокой потенциальной энергией, статистически ниже, чем в твердотопливных из-за более высокой степени автоматизации и контроля [3].

На основе анализа и статистики пожаров установлено, что котельные на твердом топливе обладают наибольшей пожарной опасностью по частоте возникновения пожаров, в то время как газовые котельные — наибольшей потенциальной опасностью при возгорании взрыва. Для котельных на мазуте характерна высокая сложность тушения развившегося пожара.

Рекомендации по снижению рисков: для газовых котельных — системы автоматического газоконтроля и взрывные клапаны; для мазутных — поддоны и пенное тушение; для твердотопливных — системы аспирации и регулярное удаление шлака и золы.

Литература

1. **СП 89.13330.2016.** Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76. М., 2017.
2. **А.В. Коршунов.** Оценка пожарной опасности котельных установок на различных видах топлива / А.В. Коршунов, А.А. Пчелинцев // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 5. С. 54–63.
3. **Т.И. Дроздова, В.А. Засухина, Н.А. Филиппов.** Прогнозный анализ аварийных пожарных рисков для котельной // XXI век. Техносферная безопасность. 2024. Т. 9. № 1. С. 32–44. URL:<https://doi.org/10.21285/2500-1582-2024-9-1-32-44>. EDN: IALLED.

Д.О. Максимов, студ. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ СУОТ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО И НАЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В рамках исследования выполнен обзорный анализ построения систем сертификации СУОТ на глобальном и региональном уровнях, внедрение которых является важным инструментом снижения профессиональных рисков, повышения эффективности управления охраной труда и подтверждения соответствия единым стандартам.

Международная инфраструктура сертификации СУОТ выстраивается последовательно: ISO 45001:2018 выступает универсальным требованием. Международный форум по аккредитации (IAF) закрепляет в Многостороннем соглашении взаимное признание аккредитационных статусов. Органы по сертификации (ОС), аккредитованные по ISO/IEC 17021-1, проводят документарный анализ и выездной аудит, после чего выдают сертификаты, признаваемые всеми участниками соглашения [1].

Национальный уровень воспроизводит указанную цепочку в правовом поле Российской Федерации. Росстандарт адаптирует ISO 45001 в форме ГОСТ Р ИСО 45001-2020, Росаккредитация осуществляет аккредитацию ОС. Процедура сертификации СУОТ носит добровольный характер и включает этапы документарной проверки, аудита на предприятии и принятия решения о выдаче сертификата. Санкционные ограничения 2022–2025 гг. привели к исключению российских ОС из IAF MLA, в результате чего признание выданных сертификатов локализовалось преимущественно в Китае и странах СНГ. Это стимулировало развитие двусторонних соглашений о взаимном признании и актуализировало задачу построения устойчивой национальной системы оценки соответствия, независимой от западных аккредитационных институтов. Следует отметить, наднациональный механизм IAF MLA перестал быть безусловной гарантией глобального признания для российских компаний..

На основании проведенного анализа выявлено, что функционирование системы сертификации СУОТ в современных условиях характеризуется дуализмом: с одной стороны, она сохраняет глобально унифицированную модель, основанную на принципах ISO/IAF, а с другой — испытывает усиление влияния национального регулирования, что в условиях геополитической напряженности проявляется в регионализации признания сертификатов и формировании новых трансграничных альянсов.

Литература

1. **Structure of the international accreditation forum, inc.** — IAF Corporate Secretary : International Accreditation Forum, Inc., 2023. — 33 с.

Е.Р. Черемных, студ.; рук. О.А. Локтионов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ИНДИКАТОРОВ РИСКА ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Индикаторы риска в сфере промышленной и энергетической безопасности представляют собой параметры, отражающие вероятность нарушения обязательных требований и ухудшения состояния безопасности на объектах. В российском регулировании их определение закреплено в Федеральном законе от 31.07.2020 № 248-ФЗ, а детализированные перечни и методика применения представлены в приказе Ростехнадзора от 23.11.2021 № 397.

Анализ нормативных и корпоративных документов показал, что крупные энергетические компании формируют собственные перечни индикаторов и адаптируют их под специфику производственной деятельности. В рамках работы выполнена систематизация наиболее распространенных индикаторов и выделены ключевые группы, отраженные в таблице. Представленная структура может быть основой для дальнейшего развития корпоративных систем управления рисками и унификации индикаторов риска по обеспечению производственной безопасности.

Таблица 1. Перечень ретроспективных и проактивных индикаторов риска

Группа индикаторов	Наименование индикатора
Общие	Показатели SAIDI, SAIFI, CAIDI и др. Объем и частота выполнения ТОиР Динамика (г/г) уровня готовности в ОЗП Динамика (г/г) диагностики электрооборудования
Безопасность труда	Динамика (г/г) НС на производстве и со сторонними лицами Объем и частота поведенческих аудитов безопасности Период выполнения мероприятий по устранению нарушений, в том числе со стороны подрядчиков
Промышл. безопасность	Количество крупных аварий на ОПО Наличие / отсутствие экспертизы промышленной безопасности технических устройств, зданий и сооружений Период выполнения мероприятий по устранению нарушений, в том числе со стороны подрядчиков
Пожарная безопасность	Динамика (г/г) пожаров / загораний Период выполнения мероприятий по устранению нарушений, в том числе со стороны подрядчиков
Государств. комплаенс	Количество, объем и период выполнения предписаний Ростехнадзора, Роструда, Росприроднадзора, МЧС и др. надзорных ведомств

Д.И. Малыгин, студ.; рук. Е.В. Федорова, к.м.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЕРСОНАЛА

Одной из фундаментальных составляющих человеческого капитала является здоровье, которое включает в себя: физическое, психофизическое и психическое состояния. Среди главных современных проблем охраны и гигиены труда работников особое место занимает проблема профессионального стресса. В результате психических расстройств и связанной с ними временной утраты трудоспособности электроэнергетика России ежегодно теряет около 25 000 рабочих дней в перерасчете на 100 000 работающих [1]. Поэтому для надежности и успешности профессиональной деятельности необходим мониторинг психического состояния персонала. В таблице 1 представлен анализ применяемых методик психофизиологического исследования.

Таблица 1. Применяемые психофизиологические методики

Мероприятие	Достоинства	Недостатки
Опросник Вайсмана	Простота интеграции в рабочий процесс, охватывает большинство ключевых факторов стресса	Ограниченная глубина анализа — опросник не выявляет причины стресса вне профессиональной среды
Шкала благополучия Риффа	Возможность определить, какие аспекты психологического здоровья нуждаются в улучшении	Наибольшая информативность для групп студенческого возраста с низким уровнем психологического благополучия

Анализ мероприятий показал, что необходим комплексный подход по применению соответствующих методик к большему числу групп испытуемых. Поэтому необходимо разработать актуальный тестовый инструмент, который будет прост во внедрении в систему психофизиологического обеспечения профессиональной деятельности персонала. Также требуется провести исследование психофизиологического здоровья респондентов, чтобы оценить эффективность разработанной методики.

Литература

1. **Талалаев А.А.** Физиолого-гигиенические основы создания системы обеспечения надежности деятельности и сохранения здоровья персонала энергопредприятий России — М., Московский НИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Диссертация докт.мед. наук. — 1996. — 329 с.

В.К. Акулинин, студ.; рук. Н.В. Звонкова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ РАССЕИВАНИЯ ВЫБРОСОВ ОТ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПО «ИНТЕГРАЛ»

Энергетика, основанная на сжигании органического топлива, является значительным источником загрязнения атмосферного воздуха. Выбросы от объектов энергетики (котельных, ТЭЦ), такие как оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x) и оксид углерода (CO), оказывают негативное воздействие на здоровье населения и экологическую обстановку в городах. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях плотной и высотной городской застройки, где процессы рассеивания загрязняющих веществ значительно усложняются. Архитектура районов способствует образованию зон, в которых наблюдается повышенная концентрация вредных примесей на разных высотах, вплоть до верхних этажей зданий. Корректное моделирование этого процесса позволяет оценить риски и разработать эффективные природоохранные мероприятия [1].

Для проведения достоверных расчетов необходимо учитывать комплекс факторов: перечень и массовый выброс загрязняющих веществ, технологические параметры источников, а также метеорологические характеристики местности. Критически важным является учет застройки, поскольку здания влияют на распространения факела выброса [2].

В результате расчета рассеивания ЗВ от стационарных источников, получены карты-схемы полей концентраций для загрязняющих веществ, проведен анализ вертикального профиля концентраций на фасадах зданий в зоне влияния источников. Установлено, что при возведении вблизи дымовых труб зданий, соразмерных по высоте с источником выброса, происходит формирование зон с чрезвычайно высокими концентрациями загрязняющих веществ. На основе проведенного моделирования разработаны рекомендации, включающие размещение жилых массивов с учетом розы ветров и внедрение мероприятий по снижению выбросов на источниках.

Литература

1. **Гиясов, Б.И.** Влияние архитектуры и планировочной структуры современной городской застройки на экологию окружающей среды / Б.И. Гиясов, Б.М. Гурович // Строительство и реконструкция. — 2022. — № 5(103). — С. 94–103. — DOI 10.33979/2073-7416-2022-103-5-94-103. — EDN UIXDZC.
2. **Ницкая, С.Г.** Некоторые подходы к моделированию рассеивания загрязняющих веществ в условиях городской застройки / С.Г. Ницкая, А.В. Геренштейн, Д.А. Дрозин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. — 2024. — Т. 16, № 3. — С. 171–181. — DOI 10.14529/chem240312. — EDN ECOOLP.

П.А. Горшкова, студ.; рук. А.Г. Бердник, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов является одним из направлений укрепления национальной безопасности Российской Федерации [1]. Ключевым элементом системы управления промышленной безопасностью является производственный контроль (ПК), в рамках которого формируется значительный массив данных в виде актов проверок, предписаний и отчетов.

Особенно важен первый уровень ПК, обусловленный его непосредственной близостью к источнику потенциальных рисков. Именно на этом уровне осуществляется ежедневная эксплуатация оборудования и ведётся непрерывное наблюдение за процессами. Формируемый на этом уровне первичный массив данных о состоянии безопасности позволяет обнаруживать и устранять нарушения на ранней стадии, предотвращая их трансформацию в серьезные аварии. В итоге первый уровень становится критически важным звеном в системе превентивного управления рисками.

Современные методы анализа рисков включают качественные и количественные методы оценки риска [2]. Поскольку данные проверок часто носят качественный характер, актуальной становится разработка инструментов количественной оценки для определения состояния промышленной безопасности объекта и отслеживания ее динамики.

Теоретической основой для разработки может послужить системный подход, предполагающий структуризацию данных ПК по ключевым направлениям. Преобразование качественных данных в количественную оценку может быть осуществлено через введение рейтинговых шкал и весовых коэффициентов, отражающих значимость каждого направления.

Таким образом, предложенная методика дополняет существующий подход и направлена на повышение эффективности оперативного управления промышленной безопасностью.

Литература

1. **Указ Президента РФ от 06 мая 2018 № 198** «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».
2. **Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03 ноября 2022 № 387** «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и риска на опасных производственных объектах».

*Д.И. Тюменева, студ.;
рук. А.С. Козодаев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Производство интегральных схем характеризуется образованием сложных по составу сточных вод, содержащих широкий спектр токсичных загрязняющих веществ. К ним относятся тяжелые металлы, фториды, токсичные органические соединения, кислоты и щелочи, а также взвешенные вещества. Актуальность проблемы очистки обусловлена значительными объемами водопотребления, высокой токсичностью стоков и ужесточением экологических нормативов — требований Федерального закона «Об охране окружающей среды». Высокая токсичность и специфичность загрязнителей требуют применения комбинированных методов очистки, включающих механическую, физико-химическую стадии.

К качеству очищенной воды предъявляются строгие требования: содержание фторидов — не более 0,5–1,5 мг/л, тяжелых металлов — 0,01–0,5 мг/л. Очистка должна обеспечивать соответствие стоков нормативам, установленным для сброса в канализацию и водные объекты. Особое внимание уделяется регенерации и повторному использованию воды в технологических процессах, где требования к ее качеству могут быть даже строже. Для эффективной очистки применяется многостадийная система, включающая: нейтрализацию, реагентное осаждение фторидов и тяжелых металлов, коагуляцию, флотацию, фильтрацию и мембранные процессы. Особое внимание уделяется раздельному сбору и предварительной очистке высококонцентрированных стоков.

В настоящее время технологии производства компонентов микроэлектроники значительно усложнились и произошло ужесточение природоохранного законодательства. Поэтому возникла острая необходимость в разработке высокоэффективных технологий очистки сточных вод.

Литература

1. **Федеральный закон** «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ.
2. **СанПиН 1.2.3685-21** «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
3. **Кольцова О.В., Симонович О.С.** Мониторинг сточных вод предприятий микроэлектроники // Вестник Учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2017. № 10. С. 89–96.

*А.В. Сергеева, студ.;
рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОТПУСКНЫХ ТАРИФОВ НА ТЕПЛОВУЮ И ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ В СЛУЧАЕ ВВЕДЕНИЯ «УГЛЕРОДНОГО НАЛОГА»

Тепловая энергетика является одним из главных источников антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ) в атмосферный воздух. На ее долю приходится 79% всех выбросов ПГ в стране [1]. Комплекс мер, направленных на уменьшение углеродного следа в энергетике, включает в себя переход на НДТ, предусматривающий замену устаревшего оборудования ТЭС на новое, более эффективное с максимальным снижением выбросов загрязняющих веществ и ПГ в атмосферный воздух.

С этой целью в ИТС 38-2024 [2] определены значения индикативных показателей удельных выбросов ПГ в качестве ориентиров достижения углеродной нейтральности в российской теплоэнергетике. Другим важным направлением климатической политики является разработка инструментов ценообразования, направленных на сокращение выбросов парниковых газов с наименьшими экономическими издержками. В качестве одного из таких инструментов рассматривается торговля квотами на выбросы парниковых газов. Первым российским проектом в этом направлении является Сахалинский эксперимент, предполагающий квотирование выбросов ПГ и взимание платы за превышение установленных квот.

Целью данной работы является определение новых ограничительных уровней индикативных показателей выбросов ПГ для различных видов ТЭС и энергетических установок при условии повышения действующих тарифов на электроэнергию и отпускных цен на тепло в диапазоне от 5 до 10%, для более эффективного стимулирования к сокращению выбросов.

Для газовой и угольной генерации электрической энергии в зависимости от типа установки были определены новые значения ограничительных уровней индикативных показателей выбросов CO_2 : газовые установки: 0,458–0,723 $\text{тCO}_2/\text{МВт}\cdot\text{ч}$, угольные установки: 1,149–1,322 $\text{тCO}_2/\text{МВт}\cdot\text{ч}$. Ограничительные уровни индикативных показателей удельных выбросов CO_2 при производстве тепловой энергии составили: газовые установки: 0,080–0,213 $\text{тCO}_2/\text{Гкал}$, угольные установки: 0,268–0,434 $\text{тCO}_2/\text{Гкал}$.

Литература

1. Основные показатели охраны окружающей среды: Стат. бюл. М.: Росстат, 2024. — 36 с.
2. **ИТС 38-2024.** Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии.: Утв. Приказом Росстандарта от 23.12.2024 N 3041.

*В.О. Милованова, студ.;
рук. И.В. Королев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Явление блуждающих токов связано с движением заряженных частиц в определенном направлении, появляющихся в почве, являющейся в данной ситуации токопроводящей средой. Электрокоррозия под воздействием блуждающих токов интенсивно разрушает подземные металлические сооружения. Для защиты этих объектов применяется комплекс мер, который делится на две основные группы: пассивная и активная защита.

Перед применением защитных мер производится оценка уровня коррозионной опасности, основными методами которой являются измерение разности потенциалов «сооружение-земля», измерение токов в стенке трубопровода и контроль потенциала для кабельных линий.

Цель пассивной защиты — предотвратить проникновение блуждающих токов из грунта на сооружение. К основным методам относятся: применение изолирующих покрытий, рациональный выбор трассы, продольное электрическое секционирование [1]. Пассивные меры защиты являются одновременно мерами защиты от почвенной коррозии.

В условиях недостаточной эффективности пассивных мер и при наличии на сооружении анодных зон, характеризующихся стеканием тока, применяется активная защита, сущность которой заключается в компенсации или принудительном отводе коррозионно-опасных токов. Основными методами активной защиты являются: электрический дренаж, катодная защита, протекторная защита и усиленный дренаж [2].

Эффективная защита подземных металлических сооружений от электрокоррозии требует комплексного подхода, сочетающего первичные пассивные меры с активными методами. Для пассивной защиты первостепенное значение имеет применение высококачественных изолирующих покрытий. Наиболее эффективными и применимыми методами активной защиты является катодная защита, выполняемая в виде специальных станций. Для объектов, расположенных вблизи источников блуждающих токов, наиболее применимым и целенаправленным методом является электрический дренаж. Протекторная защита находит широкое применение на локальных участках с низким удельным сопротивлением грунта, а также для защиты отдельных конструкций, не подключенным к станциям катодной защиты.

Литература

1. **Карницкий В.Ю., Филатова А.С.** Защита кабельных линий от коррозии // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 3. С. 139–142.
2. **Котельников А.В.** Блуждающие токи электрифицированного транспорта — М.: Транспорт, 1986. — 270 с.

Д.К. Трусов, студ.; рук. А.Г. Бердник, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Промышленная безопасность на объектах теплоэнергетики является критическим фактором надежного энергоснабжения. Специфика этих ОПО, связанная с работой под давлением, высокими температурами и горючими материалами [1, 2], требует разработки специализированной системы критериев для комплексной оценки их состояния.

Предлагаемая многоуровневая система интегрирует количественные и качественные методы.

1. Количественные критерии включают:
 - Анализ отраслевой статистики аварийности и надёжности оборудования.
 - Применение логико-графических методов («деревья отказов/событий») для моделирования аварийных сценариев.
 - Расчёт показателей риска и зон возможных последствий аварий.
2. Качественные критерии сгруппированы по четырём направлениям:
 - Анализ документации: проверка отчётности, выполнения планов ремонтов и предписаний.
 - Сбор первичных данных: инспекции, аудиты по чек-листам, интервью с персоналом и экспертами.
 - Моделирование процессов: анализ технологических цепочек и устойчивости системы, учитывая требования [3].
 - Экспертные оценки: использование методов парных/множественных сравнений и ранжирования для определения приоритетов рисков.

Внедрение данной системы позволяет перейти от фрагментарных проверок к комплексной диагностике, обеспечивая адресное управление рисками, оптимизацию ресурсов и снижение вероятности аварий на объектах теплоэнергетики.

Литература

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 № 533 (Правила безопасности газораспределения).
2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.11.2020 № 461 (Правила безопасности для оборудования под давлением).
3. СП 89.13330.2016 «Котельные установки».

*В.Б. Прудникова, студ.;
рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЧИСТЫЙ ВОЗДУХ»

Ключевой целью федерального проекта «Чистый воздух» является кардинальное снижение уровня загрязнения воздуха в крупных промышленных центрах. Цель проекта — уменьшение совокупного объема выбросов загрязняющих веществ не менее чем на 20% к 2026 году по сравнению с базовым 2017 годом.

Для мониторинга выполнения проекта «Чистый воздух» применяется методика, утвержденная Минприроды России [2], которая основана на расчете снижения совокупной (суммарной) массы выбросов «приоритетных» загрязняющих веществ без учета их класса опасности и индивидуальной вредности. Такой «весаовой» подход порождает ряд системных проблем: необъективная оценка вклада предприятий, неэффективное распределение ресурсов, отсутствие гибкости.

Поэтому в данной работе для оценки результатов проводимого эксперимента по квотированию предлагается использовать более объективные приведенные количественные показатели НВОС выбросов отдельных конкретных ЗВ с учетом не только их абсолютного валового количества, но и установленных для них санитарно-гигиенических нормативов присутствия в атмосферном воздухе

Преимущества предлагаемого подхода: автоматическое выявление веществ, наносящих наибольший вред, гибкость и эффективность, объективность результатов. Также рассматриваемая методика позволяет снижение приведенного суммарного выброса ЗВ за счет снижения массы выбросов другого приоритетного вещества.

Литература

1. **Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Тихонова И.О., Бурвикова Ю.Н. (2025)** К вопросу об объективной оценке показателей снижения выбросов загрязняющих веществ в рамках выполнения федерального проекта «Чистый воздух», Экологический мониторинг и моделирование экосистем, т. XXXVI, № 1–2, с. 107–125, doi: 10.24412/2782-3237-2025-1-2-107-125
2. **Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 480 от 29 июля 2021 года** «Об утверждении методик расчета целевых показателей «снижение совокупного объема выбросов опасных загрязняющих веществ в городах — участниках проекта», «снижение совокупного объема выбросов за отчетный месяц»,...»

Ю.И. Попов, студ.; рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

Проблема утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) в России имеет масштабный характер. Накоплено более 1,7 млрд тонн ЗШО, занимающих свыше 28 тыс. гектаров, что создает серьезные экологические и экономические проблемы для энергетического сектора. Утилизация ЗШО достигает лишь 10–20%, остальное складывается на исчерпавших емкости золоотвалах. В зарубежных странах этот показатель варьируется от 50 до 100% (ЕС, Китай, США, Япония и др.) благодаря комплексному подходу с развитой нормативно-технической базой, государственной поддержкой, деятельностью профильных организаций и устойчивым спросом на продукцию из ЗШО.

Химический состав ЗШО представляет значительную ценность. ЗШО содержат оксиды кремния, алюминия, титана, калия, железа, натрия, кальция и магния, что делает их дешевым и полезным вторичным сырьем. Основные направления переработки ЗШО включают производство строительных материалов, дорожное строительство, рекультивацию земель, заполнение горнорудных выработок и добычу редкоземельных металлов.

В России существует ряд ключевых проблем, связанных с утилизацией золошлаковых отходов (ЗШО). К ним относятся: различие систем золошлакоудаления, нехватка законодательных, правовых и нормативных актов, значительные расстояния между предприятиями-потребителями и предприятиями-изготовителями, а также недостаточная проработанность технологий и отсутствие устойчивого спроса на ЗШО.

В рамках работы выполнены технико-экономические оценки трех перспективных способов утилизации ЗШО: в качестве добавки при производстве цемента, для отсыпки и укрепления земляного полотна дорог, а также для извлечения ценных металлов. Показано, что данные направления способны эффективно решить проблему ликвидации золоотвалов и обеспечить существенную экономическую выгоду для всех участников процесса переработки по сравнению с традиционными методами.

Литература

1. **Распоряжение Правительства РФ от 15.06.2022 № 1557-р** «Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности».
2. **Федеральный закон РФ от 14.07.2022 № 343-ФЗ** «О внесении изменений в Закон РФ «О недрах» и отдельные законодательные акты РФ».

В.О. Рыбакова, студ.; рук. Н.В. Звонкова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ОТХОДОВ ВИЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ВИЭ

Стремительный рост мощностей ветроэнергетики и фотовольтаники формирует новую экологическую проблему — образование значительных объемов специфических отходов. Утилизация таких отходов, особенно композитных лопастей и многослойных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), технологически сложна. Систематизация данных об источниках, составе и прогнозируемых объемах отходов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для создания информационной базы для разработки системы критериев НДТ является важной научно-практической задачей [1].

Мировой пик вывода из эксплуатации ветроэнергетических установок (ВЭУ) ожидается к 2035 г., с образованием до 400 тыс. тонн отходов лопастей ежегодно. Для ФЭМ поток отходов к 2050 г. может достигнуть 60–78 млн. тонн. В России волна отходов смещена на 5–10 лет, но требует заблаговременных решений. Основными проблемами являются: отсутствие специализированной нормативной базы для отходов ВЭУ и ФЭМ, неразвитость инфраструктуры сбора и переработки, дефицит экономически доступных технологий утилизации для оборудования ВИЭ [2].

ВЭУ: основной источник отходов — лопасти из углеродного волокна или стекловолокна, эти материалы трудно поддаются переработке из-за неоднородности состава и сложности разделения на исходные компоненты. ФЭМ: отходы представляют собой сложные композиты: стекло, алюминий, полимеры, кремний, а также следы тяжелых металлов. Разделение и очистка ценных компонентов является сложной задачей в утилизации солнечных панелей [3].

Системные проблемы в сфере обращения с отходами ВИЭ показывают необходимость разработки комплексного подхода к их решению, в том числе, создание системы критериев для подбора технологий утилизации таких отходов, учитывающей технологическую, экономическую и экологическую эффективность.

Литература

1. **РЭА. Минэнерго России.** Возобновляемая энергетика в России и мире. 2022.
2. **Аналитический центр при Правительстве РФ.** Развитие возобновляемой энергетики в России: тенденции и прогнозы. 2022.
3. **Сибикин Ю.Д.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. — 2-е изд., стереотип. — Москва: КноРус, 2021. — 227,[1]с. — 229 с. УДК 620.97(075.8).

Т.В. Памбухчан, студ.; рук. А.Г. Бердник, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

В условиях ужесточения требований промышленной безопасности вследствие катастрофических аварий на опасных производственных объектах (далее — ОПО) и роста технологической сложности нефтеперерабатывающих производств особую актуальность приобретает переход от реактивной модели обеспечения безопасности к проактивной. Совершенствование системы управления промышленной безопасностью [1] на ОПО, к которым относятся нефтеперерабатывающие заводы (далее — НПЗ), требует комплексного подхода, охватывающего как технические, так и организационные аспекты.

На основе передовых практик на российских и зарубежных НПЗ были разработаны следующие рекомендации: внедрение систем предиктивной аналитики на основе данных с датчиков оборудования для раннего выявления отклонений от нормальных режимов работы; автоматизацию сбора, обработки и анализа данных об инцидентах и близких к аварийным ситуациям с целью формирования корректирующих мероприятий; систематическое развитие культуры безопасности среди персонала через обучение, внутренние аудиты и мотивацию за соблюдение правил промышленной безопасности.

Эффективность данных мер подтверждена на примере одного из модернизированных НПЗ. Внедрение предиктивной аналитики позволило снизить количество инцидентов с 50–60 до 15–29 в месяц; автоматизация сбора и анализа данных сократила время обработки информации с 5–7 дней до 1 суток; а регулярные тренинги по безопасности в совокупности с техническими улучшениями увеличили среднее время между отказами оборудования с 12 до 18 месяцев.

Таким образом, реализация предложенного комплекса мер обеспечивает не только снижение рисков аварий, но и повышение общей надежности и эффективности производственных процессов. В перспективе планируется развитие подхода за счёт создания цифровых двойников критически важного оборудования, что позволит моделировать потенциальные сценарии отказов и своевременно принимать предупреждающие решения.

Литература

1. **Федеральный закон №116-ФЗ от 21.07.1997 г. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».**

Е.А. Иванова, студ.; рук. Н.В. Звонкова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ Г. МОСКВЫ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ОКСИДАМИ АЗОТА

Одними из наиболее значимых загрязняющих веществ в атмосфере, формирующих химические процессы в тропосфере, являются оксиды азота (NO_x), включающие монооксид азота (NO_x) и диоксид азота (NO_2). Данные выбросы оказывают прямое влияние на образование приземного озона, фотохимического смога и вторичных частиц, что усиливает риски для здоровья населения, особенно у людей с астмой и болезнями дыхательной системы. Основными антропогенными источниками NO_x остаются транспортный сектор, энергетические установки, промышленные процессы и бытовое сжигание топлива.

Энергетические установки теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и крупных котельных, являются существенными локальными источниками выбросов оксидов азота (NO_x) в г. Москва. Вокруг крупных ТЭЦ образуются зоны повышенных концентраций NO_2 , особенно в холодное время года, когда возрастает потребность в отоплении.

Для оценки влияния энергетических установок применяются современные методы мониторинга. В основном это результаты измерений наземных станций непрерывного автоматизированного контроля, расположенных на территориях с различной антропогенной нагрузкой, позволяющие получить достоверную информацию для принятия управленческих решений в области снижения воздействия на окружающую среду и оценки эффективности природоохранных мероприятий. Такие данные помогают выявлять локальные участки повышенных концентраций и сравнивать фактические уровни загрязнения с отчётными данными предприятий.

На основании анализа разрабатывают меры по снижению выбросов: модернизация оборудования ТЭЦ, внедрение технологий, уменьшающих образование NO_x при сжигании топлива, улучшение системы мониторинга. Такой подход способствует снижению негативного воздействия энергетического сектора на здоровье жителей Москвы и улучшению экологической обстановки города.

Литература

1. **Битюкова В.Р.**, Пространственная структура ареалов загрязнения от ТЭЦ г. Москвы (анализ выбросов и топлива) // *Экология и промышленность России*. — М: МГУ, 2021, с. 54–60.
2. **Артамонов Г.Е., Васенев И.И., Гутников В.А.**, Экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях города Москвы // *Экология урбанизированных территорий*. — М: Камертон, 2023, с. 16–25.

Т.С. Булгакова, студ.; рук. Е.А. Кузнецова, к.с.н., доц. (НИУ «МЭИ)»

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Одной из важнейших комплексных характеристик социально-экономического развития общества, критериев его экономического роста является качество трудовой деятельности, а его ключевой составляющей — безопасные условия труда, которые обеспечиваются благодаря реализации мероприятий по охране труда [1].

Оценка экономических потерь, связанных с профессиональными заболеваниями, производственными травмами и авариями, представляет собой сложную задачу. Эта сложность объясняется нехваткой первоначальных данных и отсутствием детализированной статистической отчетности об экономических последствиях травматизма и профессиональных заболеваний на большинстве предприятий.

Экономическая эффективность мероприятий по охране труда должна определяться ещё на стадии планирования для обоснования как социальной, так и экономической эффективности проектируемых решений и выбора их оптимального варианта. Правильно разработанный комплекс мероприятий, направленных на улучшение условий труда, может обеспечить прирост производительности труда на предприятии до 20% [2]. Необходим инструментарий, позволяющий предприятиям не только оценивать достигнутые результаты в области охраны труда, но и формировать стратегическую политику по их дальнейшему улучшению.

Инвестиции предприятий в улучшение условий труда, а также в разработку и реализацию мер по снижению уровня производственного травматизма и профессиональной заболеваемости могут обеспечивать экономическую выгоду, выраженную в:

- 1) Увеличении периода профессиональной активности трудящихся;
- 2) Росте производительности труда;
- 3) Сокращении потерь, связанных с травматизмом;
- 4) Уменьшении текучести кадров;
- 5) Сокращении затрат на льготы и компенсации.

Литература

1. **Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 771н** «Об утверждении Примерного перечня ежегодно реализуемых работодателем мероприятий по улучшению условий и охраны труда, ликвидации или снижению уровней профессиональных рисков либо недопущению повышения их уровней».
2. **Маринина О.А., Невская М.А.** // Экономика безопасности труда: Учебное пособие. — СПб.: Медиапапр, 2020. — 176 с.

О.В. Хажметов, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В БЭС

Быстровозводимые электрические сети (БЭС), применяемые для оперативного электроснабжения временных, удалённых и аварийных объектов, характеризуются нестандартными условиями эксплуатации, что усложняет применение традиционных методик расчёта потерь электроэнергии. Основные методики, используемые в распределительных сетях напряжением 6–10 кВ [2–3], разработаны для стационарных электрических сетей и содержат ряд допущений, которые оказываются неприменимыми к мобильным комплексам.

К числу методических ограничений относится жёсткая привязка существующих расчётных моделей к фиксированной длине линий, стационарным способам прокладки и стабильным режимам нагрузки. В БЭС же длина трассы, профиль кабеля и условия прокладки могут меняться от развертывания к развертыванию, а нагрузка имеет выраженный нестационарный характер. Кроме того, действующие нормативные документы не описывают особенности потерь в облегчённых кабелях, предназначенных для прокладки по земле, воздуху или воде.

Нормативно-расчётные подходы также не предусматривают оценку потерь в мобильных трансформаторных подстанциях, применяемых в составе БЭС, и не учитывают влияние повышенных удельных сопротивлений кабелей облегчённого исполнения. В результате применение действующих методик приводит к значительным погрешностям при определении фактических потерь электроэнергии.

Выявленные ограничения подтверждают необходимость разработки специализированной методики расчёта потерь электроэнергии в БЭС, ориентированной на переменные условия прокладки, мобильный характер оборудования и специфические режимы работы временных сетевых комплексов. Кроме того, требуется разработать математические модели, способные адаптироваться к изменяющимся параметрам сети в реальном времени.

Литература

1. Удинцев Д.Н., Тульский В.Н., Кочнев С.С., Черемисин В.В. Быстровозводимые электрические сети // Энергетик. 2024. № 3. С. 19–24.
2. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».
3. Методические рекомендации по определению потерь электрической энергии в городских электрических сетях напряжением 10(6)-0,4 кВ.

И.С. Рогожин, студ.; рук. И.В. Королев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУППОВОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ»

Эффективность и безопасность работы электроустановок во многом зависят от качества выполнения заземляющих устройств (ЗУ): сложные групповые заземлители, состоящие из большого числа электродов. При их расчете необходимо учитывать: взаимное расположение и влияние электродов, неоднородность и слоистость грунта [1].

Существующая виртуальная лабораторная работа не позволяет студентам приобрести в полной мере необходимые практические навыки по выполнению измерений и оценок сопротивления растекания тока сложных групповых заземлителей. Отсутствие наглядного физического оборудования, адекватно моделирующего различные условия, не дает возможность при проведении экспериментов выявить и понять факторы, определяющие эффективность заземляющих устройств.

В рамках работы планируется разработать лабораторный стенд «Определение сопротивления группового заземлителя» (рис. 1).

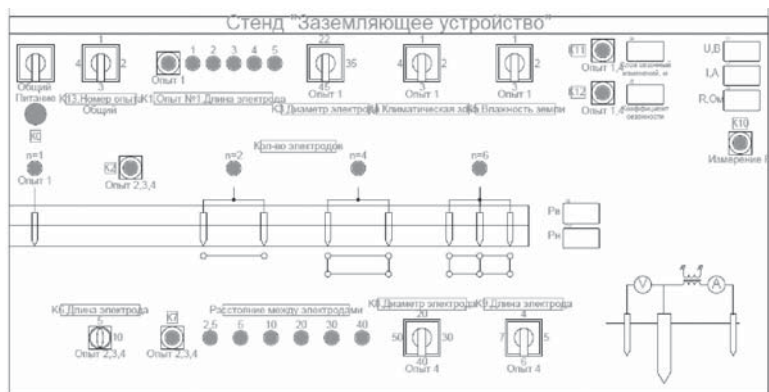


Рис. 1. Макет стенда

Экспериментальный стенд позволит изменять конфигурацию заземляющего устройства и имитировать различные показатели, такие как неоднородность и слоистость грунта.

Использование лабораторного стенда позволит: производить расчеты для выбора параметров элементов стенда; разработать собственные методики для проведения измерений. Стенд планируется оснастить сенсорным экраном, который отображает схемы заземлителей, данные, соответствующие выполняемому варианту работы, а также результаты измерений.

Литература

1. **Правила устройства электроустановок (ПУЭ).** — 7-е изд. — М. : НЦ ЭНАС, 2003. — 480 с. — ISBN 5-93196-182-3.
2. **Манойлов, О.Е.** Основы электробезопасности / О.Е. Манойлов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. — 248 с. : ил.

К.М. Хмелев, студ.; рук. А.С. Козодаев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВ ОТ СЖИГАНИЯ ТКО

Активное строительство мусоросжигательных заводов (МСЗ) в России в рамках реализации «мусорной реформы» приводит к формированию новых значительных потоков отходов — золошлаков (ЗШ). Согласно данным Росприроднадзора, на каждый 1 млн тонн сожженных твердых коммунальных отходов (ТКО) образуется около 250–300 тыс. тонн золошлаковых остатков. С учетом ввода в эксплуатацию новых заводов совокупная мощность МСЗ в стране к 2026 году может достигнуть 7–8 млн тонн ТКО в год, что приведет к ежегодному образованию до 2 млн тонн ЗШ.

Прогнозы, основанные на темпах ввода новых мощностей, указывают на то, что к 2030 году Россия может столкнуться с необходимостью размещения до 15–20 млн тонн золошлаков только от объектов энергетической утилизации ТКО. При этом, согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, ЗШ от ТКО характеризуются IV классом опасности из-за потенциального содержания тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей. Это существенно ограничивает возможности их складирования и требует обязательной переработки [1].

Мировая практика демонстрирует различные пути утилизации золошлаков от МСЗ. Наиболее перспективным направлением является стабилизация и использование ЗШ в строительной индустрии после обязательной процедуры проверки на экологическую безопасность [2]. Исследования показывают, что до 70–80% образующихся золошлаков могут быть использованы в качестве вторичного материала при производстве цемента, асфальтобетона, тротуарной плитки [2].

Экономический эффект от внедрения таких решений двоякий. Во-первых, достигается прямая экономия на захоронении, стоимость которого постоянно растет. Во-вторых, снижается себестоимость строительных материалов за счет замены дорогостоящих первичных ресурсов [2]. Расчеты показывают, что комплексная переработка 1 млн тонн золошлаков от МСЗ может принести экономический эффект в размере 1,5–2 млрд рублей и сократить объем захоронения на 80–90%.

Литература

1. **Штерн И.М.** Утилизация и обезвреживание отходов термической переработки твердых коммунальных отходов // Экология и промышленность России. — 2020. — Т. 24. — № 12. — С. 52–57.
2. **Лейченко С.Г., Федосеев А.Д.** Перспективы использования золошлаковых материалов от сжигания ТКО в строительстве // Строительные материалы. — 2021. — № 8. — С. 44–49.

К.Д. Волков, студ.; рук. Н.В. Васильева, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВНЕДРЕНИЮ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА НА ОПАСНЫХ ЭНЕРГООБЪЕКТАХ

Опасные энергообъекты эксплуатируются в напряженных режимах, при этом значительная доля аварий и несчастных случаев обусловлена человеческим фактором [1].

Необходим комплексный подход к внедрению систем контроля состояния оперативного персонала: выбор технических средств (носимые устройства, аналитическое программное обеспечение) обуславливается классификацией типов энергообъектов и видов оперативного персонала, а также с требованиями системы менеджмента безопасности труда.

Сводная таблица средств мониторинга и классов энергообъектов

Средство мониторинга	Контролируемые параметры	Класс энергообъекта
Фитнес-браслет	Частота пульса, уровень активности, шаги, качество сна	Обычные энергообъекты, не относящиеся к ОПО I–II класса
Промышленные носимый трекер (датчик положения, тревожная кнопка)	Положение работника, факт падения, отсутствие движения, сигнал «человек в опасности»	Энергообъекты повышенной опасности, ОПО III класса
Комплексный модуль мониторинга (нагрудный датчик, датчики в каске или поясе)	Частота и вариабельность сердечного ритма, температура тела, координаты, положение тела в пространстве	Опасные энергообъекты ОПО I–II класса, взрывопожароопасные и подземные объекты

Внедрение таких решений позволит оперативно выявлять предаварийные состояния работников, снизить частоту нарушений регламентов и, как следствие, риск техногенных аварий и производственного травматизма, а также обосновать экономическую целесообразность инвестиций в «цифровую безопасность» персонала [2].

Литература

1. **Роговцев А.** Автоматизация ОТиПБ: носимые устройства. Электроцех. 2022.
2. **Чумаков К.В.** Тенденции в современных системах мониторинга промышленной безопасности и охраны труда // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. — 2024.

И.С. Ануфриков, студ.;
рук. А.Л. Суздалева, д.б.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЯ НИЗКОГО СТОКА РЕК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И НАГРУЗКУ НА ВОДОПРИЕМНИК

Изменение климата, проявляющееся в учащении периодов экстремальных засух, приводит к значительному снижению водности малых и средних рек. Согласно гидрологическим наблюдениям, в летне-осенние периоды последних лет меженный сток ряда водотоков Центральной России снижался на 40–60% от многолетней нормы. Это создает критическую нагрузку на водные экосистемы, принимающие очищенные сточные воды, так как их способность к разбавлению и самоочищению резко падает [1].

Прогнозы климатических моделей указывают на усиление частоты и продолжительности засушливых периодов в ближайшие десятилетия. В этих условиях даже нормативно очищенные стоки, сбрасываемые с городских очистных сооружений (ОС), могут стать источником вторичного загрязнения для рек с низким расходом. Особую опасность представляют биогенные элементы (азот и фосфор), способные спровоцировать эвтрофикацию, и специфические загрязнители, эффективность удаления которых на ОС также может снижаться при изменении состава и концентрации поступающих стоков [2].

Наиболее уязвимым этапом является биологическая очистка, в частности процессы нитриденитрификации, чувствительные к изменению нагрузки, температуры и концентрации кислорода. Снижение расхода водоприемника на 50% может привести к 2–3-кратному росту концентраций загрязняющих веществ в контрольном створе при штатной работе ОС [3].

Экологический и экономический эффект от внедрения адаптивных мер значителен. Во-первых, предотвращается деградация водных экосистем и связанные с этим риски для биоразнообразия и рекреации. Во-вторых, оптимизация режима работы ОС (коррекция нагрузки на активный ил, введение реагентной поддержки) позволяет избежать сверхнормативных сбросов и штрафных санкций. Моделирование показывает, что адаптация технологического регламента ОС к режиму низкого стока рек может снизить антропогенную нагрузку на водоприемник на 25–30% [3].

Литература

1. **Кац Д.М.** Влияние климатических изменений на гидрологический режим рек и качество воды // Водное хозяйство России. 2022. № 4. С. 32–45.
2. **Суздалева А.Л., Горюнова С.В.** Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ИД Энергия, 2014. 456 с.
3. **Лопатина А.В., Семенов К.И.** Адаптация технологий очистки сточных вод к условиям экстремального обводнения и маловодья // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 1. С. 58–63.

В.А. Мельников, студ.; Е.Г. Гашо, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЭЦ И КОТЕЛЬНЫХ

Эксплуатация тепловых электростанций (ТЭС) и котельных сопряжена со значительным воздействием на окружающую среду, прежде всего, за счёт выбросов в атмосферу (оксидов серы и азота, твёрдых частиц), образования твёрдых отходов (золы и шлака), а также термического и химического загрязнения водных ресурсов. Решение этой проблемы требует комплексной стратегии, сочетающей технологическую модернизацию, изменение топливной политики и совершенствование систем управления.

Важнейшим направлением развития является внедрение современных технологий сжигания и очистки. К ним относятся такие методы, как низкотемпературное вихревое сжигание (НТВ), которое выглядит многообещающим не только потому, что значительно сокращает вредные выбросы, образующиеся в процессе сжигания, но и потому, что используется в сочетании с высокоэффективными системами газоочистки, такими как электрофильтры и скрубберы. Другим важным и полезным достижением должна быть стадия перехода на другие виды топлива. Изменение топлива на меньших котельных, с угля на природный газ значительно сокращает выбросы парниковых газов [1].

Снизить воздействие на окружающую среду невозможно без улучшения управления отходами и контроля за ними. Это подразумевает организацию систем переработки золы и шлака и их безопасной, безвредной утилизации; проведение автоматизированного мониторинга выбросов; и неукоснительное соблюдение правил, касающихся санитарно-защитных зон. Никакого существенного и заметного снижения воздействия тепло- и электроэнергетики на окружающую среду невозможно достичь без одновременного и комплексного сокращения ряда других факторов: например, сокращения выбросов и различных способов ненадлежащего и небрежного внедрения технологий, которые в прошлом приводили к чрезмерному производству тепла и электроэнергии.

Кроме того, частью стратегии снижения экологического воздействия является повышение энергоэффективности ТЭЦ. Это можно достичь путём оптимизации процессов сжигания топлива. Снижение потерь энергии на всех этапах производства тепла и электроэнергии уменьшит загрязнение окружающей среды, но и снизит экономические затраты на топливо.

Литература

1. **Michael Jakob, Jérôme Hilaire, Jan C. Minx**, Germany's decision to phase out coal by 2038 lags behind citizens' preferences for a coal exit, 2019.

З.М. Марттинен, студ.;
рук. А.Л. Суздалева, профессор (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ БИОПЛЕНКИ В ТРУБКАХ КОНДЕНСАТОРОВ АЭС НА ТАРИФЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Себестоимость электроэнергии, производимой на АЭС, формируется под влиянием состояния не только реакторного, но и тепломеханического оборудования. Конденсаторы турбин определяют КПД цикла, а одним из основных факторов снижения его эффективности, ведущим к экономическим потерям, является биологическое обрастание теплообменных поверхностей. Образование бактериальной биопленки в значительной степени зависит от качества воды в водоеме-охладителе АЭС: температуры, наличия растворенных органических веществ и расселительных стадий организмов-обрастателей [1]. Оценка влияния биологического обрастания трубок конденсаторов помогает выявить скрытые издержки, прогнозировать рост тарифов и оптимизировать эксплуатационные расходы, что позволяет управлять тарифной нагрузкой на потребителей [2]. Выстраивается определенная последовательность причинно-следственных связей от микроскопического обрастания до макроэкономических последствий, включающая несколько этапов.

а) В трубках конденсаторов образуется бактериальная биопленка. Этот быстрорастущий слой выступает как теплоизолятор, увеличивая тепловое сопротивление стенки трубок. б) Ухудшается теплообмен, что приводит к росту давления и падению вакуума в конденсаторе [3]. в) Снижение вакуума уменьшает полезную работу пара в турбине, вызывая потерю электрической мощности. В свою очередь, постоянная потеря мощности влечет за собой недовыработку планового объема электроэнергии. г) Недовыработка и затраты на борьбу с обрастанием повышают удельные издержки производства. д) Рост издержек энергокомпании в конечном итоге влияет на формирование оптовых и розничных тарифов для потребителей [4].

Таким образом, микроскопическая бактериальная биопленка через последовательность технических и экономических преобразований оказывает прямое влияние на макроэкономический показатель — стоимость электроэнергии для потребителя.

Литература

1. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ИД Энергия, 2014. 456 с.
2. Публичные годовые отчеты ПАО «Росэнергоатом» за 2021–2023 гг. М.: Росэнергоатом, 2022–2024.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 № 1178 (ред. от 28.12.2022) «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике».

Направление VI

ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ

Economics and management

Руководитель направления:

Заведующий кафедрой

менеджмента в энергетике

и промышленности НИУ «МЭИ»

к.э.н., доцент

Кетоева Наталья Леонидовна

Секция 30
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ
General issues of the economy

Председатель секции: Коновалова Оксана Геннадьевна

Секретарь секции: к.т.н. Коломиец Юлия Георгиевна

К.А. Рыбина, студ.; рук. А.О. Бучнев, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ УМНОГО ГОРОДА

Актуальность исследования заключается в том, что умные города предъявляют спрос на цифровые решения, а высокий уровень потерь электроэнергии в сетях является экономической проблемой для энергокомпаний и сдерживающим фактором для развития городской инфраструктуры.

Объектом исследования — городская инфраструктура современного мегаполиса. Предмет исследования — внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии.

Целью работы является обоснование целесообразности внедрения умных счетчиков в энергосистему умного города.

Использование и внедрение интеллектуальных приборов учета дает возможность точного и автоматизированного учета потребляемой электроэнергии, что уменьшает количество коммерческих потерь, а также упрощает поиск аварий на сети. У умных счетчиков есть ряд преимуществ, например, снижение потребления электроэнергии на 5–15%. [1] А также умные счетчики способствуют устойчивому развитию города.

По проведенным расчетам, после внедрения цифровой технологии потери электроэнергии должны значительно сократиться — с 38,61% до 14,2%, то есть, более, чем в два раза. Соответственно, в разы сократится и потребление ресурсов на производство электроэнергии. В работе были использованы такие методы исследования, как статистический и экономический анализ, сравнительный анализ.

За счет сокращения потерь электроэнергии при подключении потребителей, появляется возможность электрифицировать дополнительные районы и, следовательно, большее число горожан, а также отдаленные улицы оснастить электроэнергией. Тем самым, в городе будет становиться безопаснее. Получается, что внедрение одной технологии позволяет решить комплексно сразу несколько проблем на уровне городской среды.

Научная новизна исследования состоит в разработке методического подхода к внедрению умных счетчиков, включающего не только экономический фактор, но и обеспечение устойчивого развития, формирование культуры потребления и цифровую трансформацию.

Литература

1. **Рыжов Б.В.** Роль умных счетчиков в цифровой трансформации энергетики: технологии и принципы работы // УСТОЙЧИВОЕ развитие РОССИИ — 2024: 6-й Всерос. конф. Петрозаводск.

*Е.В. Журавлева, студ.;
рук. О.Г. Коновалова, ст. препод. (НИУ «МЭИ»)*

НЕМАТЕРИАЛЬНЫЕ АКТИВЫ КАК ИСТОЧНИК НАЛОГОВОЙ ЭКОНОМИИ И РИСКОВ

В эпоху цифровой экономики и доминирования интеллектуального капитала именно НМА все чаще становятся ядром стоимости компании.

Нематериальный актив — это идентифицируемый немонетарный актив, не имеющий физической формы. Фундаментальная проблема НМА, лежащая в основе как возможностей, так и рисков — это сложность их оценки. Если стоимость станка легко определяется рынком, то как оценить стоимость бренда или уникального алгоритма? Именно эта оценочная гибкость и создает поле для налогового маневра.

На основе проведенного исследования, можно сделать вывод, что в целях оптимизации налогообложения НМА стоит руководствоваться следующими подходами:

- Амортизация позволяет равномерно или ускоренно учесть стоимость актива, уменьшая налогооблагаемую базу;
- Государство предоставляет специальные налоговые льготы для расходов на НИОКР, результатом которых могут стать новые НМА;
- ФИНВ и РИНВ — механизмы, позволяющие уменьшить сумму налога на прибыль на инвестиционные расходы на НМА;
- Патентный бокс позволяет снизить налоговую нагрузку в отношении доходов, получаемых в виде лицензионных платежей (роялти) от использования объектов интеллектуальной собственности.

Однако НМА одновременно представляют собой и сложнейший инструмент финансового инжиниринга, открывающий как огромные возможности для налоговой оптимизации, так и создающий существенные риски для бизнеса. Таким образом, на наш взгляд наиболее актуальными рисками являются:

- Риски неправильного определения стоимости НМА и прав пользования;
- Риски, связанные с классификацией объекта;
- Риски невыполнения требований для отражения объекта в составе амортизируемого имущества;
- Риск оспаривания рекламных расходов на поддержание бренда.

Важно отметить, что проведенный автором анализ позволяет разрабатывать эффективные стратегии управления НМА и минимизации налоговых рисков.

Литература

1. **Официальный сайт** ФНС России — [Электронный ресурс] — <https://www.nalog.gov.ru>

О.С. Останькович, студ.;
рук. Д.А. Смирнова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ АО «АТОМДАТА»

В условиях глобального бума цифровизации: искусственного интеллекта, облачных решений, активного роста мирового интернет-трафика, Россия строит собственную систему обработки данных. Актуальность дата-центров высока и продолжает расти как во всем мире, так и в нашей стране. Рынок центров обработки данных (ЦОД) развивается активно, вопреки геополитическим вызовам и нехватке кадров, этому способствуют государственные проекты и частные инвестиции. Дата-центры превращаются в стратегически важные объекты инфраструктуры цифровой экономики. Строительство дата-центров стало рассматриваться как перспективное направление инвестиций. Объем российского рынка ЦОДов на начало 2025 г. составляет 156,5 млрд. рублей при 82,4 тыс. стойко-мест и суммарной мощности 841,5 МВт. [1]

Одна из важнейших отраслей нашей страны — атомная отрасль, остро нуждается в укреплении суверенной цифровой инфраструктуры. ГК «РОСАТОМ» в рамках Национальной Программы «Цифровая экономика РФ» согласно Указа Президента РФ от 21.07.2020 г. «О Национальных целях развития страны на период до 2030 года» принимает активное участие в создании ряда инвестиционных проектов по строительству дата-центров.

Строительством ЦОДов будет заниматься дочерняя компания «Росатома» — АО «АТОМДАТА», которая с 2020 года выступает центром компетенций Госкорпорации по созданию геораспределенной, катастрофоустойчивой цифровой инфраструктуры. Текущий уровень сети ЦОД «РОСАТОМ» составляет 6570 стойко-мест мощностью 85,8 МВт. [2] Сейчас в разработке находится 7 проектов по строительству новых ЦОД в России общей мощностью до 140 МВт, которые планируется ввести в эксплуатацию до конца 2030 г. Потенциал развития до 16 000 стойко-мест, в перспективе — создание собственной сети передачи данных, объединяющей все площадки ЦОД. Объектом исследования является инвестиционный проект строительства ЦОД группы компаний АО «АТОМДАТА».

В работе проведена экономическая оценка инвестиций в объект, найден срок окупаемости, ЧДД, сделан вывод об эффективности данного проекта.

Литература

1. Как «Росатом» участвует в развитии отечественного рынка дата-центров // <https://atomdata.ru> (дата обращения 24.10.2025).
2. Обзор рынка коммерческих дата-центров 2025 // <https://businessstat.ru> (дата обращения 24.10.2025).

Д.А. Платонова, студ.; рук. И.Е. Ларина, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСЦЕНЕНИЯ ГУДВИЛЛА: ДИАГНОСТИКА И ПОСЛЕДСТВИЯ

В современной экономике, где растущую роль играют нематериальные активы, особое значение приобретает понятие гудвилла.

Принято выделять внутренний и внешний гудвилл. Внутренний гудвилл связан с ее внутренними ресурсами, такими как репутация, корпоративная культура, технологии, и не подлежит отражению в финансовой отчетности.

Внешний гудвилл, напротив, проявляется в процессе сделок слияния и поглощения. Он представляет собой разницу между рыночной и балансовой стоимостью предприятия, отражая нематериальную ценность, которую покупатель готов оплатить сверх суммы материальных активов.

Понятие обесценения применимо прежде всего к внешнему гудвиллу. Диагностика обесценения гудвилла — сложный процесс, требующий регулярного анализа рыночной конъюнктуры, финансовых показателей и управленческих решений. Основным инструментом оценки служит тест на обесценение, сравнивающим балансовую стоимость единицы, генерирующей денежные потоки, с её возмещаемой стоимостью. Превышение балансовой стоимости над возмещаемой признаётся убытком. Формально это можно представить в виде формулы:

$$\text{Loss} = \text{BV} - \text{RV},$$

где Loss — сумма убытка от обесценения; BV — балансовая стоимость единицы, генерирующей денежные потоки; RV — возмещаемая стоимость единицы [1].

В ходе анализа материалов были выявлены следующие причины обесценения гудвилла: неудачные сделки слияний и поглощений, ухудшение макроэкономических условий или управленческие ошибки. Последствия обесценения проявляются как в финансовой отчётности, так и на уровне рыночных ожиданий: убыток от обесценения часто воспринимается инвесторами как сигнал о снижении потенциала компании, что ведёт к падению стоимости акций.

По результатам работы авторы пришли к выводу, что своевременная диагностика и управление рисками обесценения гудвилла являются ключевыми элементами корпоративной стратегии. Эффективная система мониторинга гудвилла позволяет избежать финансовые потери, сохранить доверие инвесторов и обеспечить устойчивое развитие компании в долгосрочной перспективе.

Литература

1. **Международный стандарт финансовой отчетности (IAS) 36** «Обесценение активов» (введен в действие на территории Российской Федерации Приказом Минфина России от 28.12.2015 N 217н) (ред. от 14.12.2020).

*К.С. Шостакова, студ.;
рук. Ю.Г. Коломиец, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ПО ВНЕДРЕНИЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕДПРИЯТИЕ РЕКЛАМНОГО БИЗНЕСА

Исследование, нацеленное на оценку эффективности инвестиционного проекта по внедрению цифровых технологий, является наиболее актуальным так как объемы инвестиций в инновационные форматы рекламы с каждым годом увеличиваются и достигают 693 млрд. руб. Целью работы является обоснование эффективности инвестиционного проекта по внедрению цифровых технологий в рекламный бизнес, рассчитав экономические показатели и предложив рекомендации.

Для выполнения данной работы было выбрано и проанализировано внедрение ИИ в медиа рекламу. Для оценки дополнительной прибыли была использована формула:

$$\Pi_{\text{доп}} = N_1 \cdot (S_1 - S_2), \quad (1)$$

Для расчета были взяты усредненные показатели по отрасли:

N_1 — число новых потребителей, 500 человек.

S_1 — цена товара, 1 500 000 рублей (для среднего бизнеса).

S_2 — стоимость привлеченного потребителя (CPA), 1000 рублей без ИИ; 500 рублей с ИИ.

Для анализа было принято решение снизить в среднем половину стоимости привлечения клиента, то обосновывается тем, что на разных платформах таких как Яндекс.Директ, VK Ads и myTarget показатели варьируются. И по результатам эксперимента «СберМаркетинг» показали, что на сгенерированную, по сравнению с баннерной, рекламу затраты были меньше, а эффективность в разы выше. Таким образом они сделали вывод, что CPA у сгенерированной рекламы меньше на 76%, чем у баннерной [1].

$$\Pi_{\text{доп}} \text{ без ИИ} = 500 \cdot (1\,500\,000 - 1\,000) = 749\,500\,000$$

Тем временем как с ИИ составило бы:

$$\Pi_{\text{доп}} \text{ с ИИ} = 500 \cdot (1\,500\,000 - 500) = 749\,750\,000$$

Таким образом с помощью внедрения ИИ в маркетинг стоимость привлеченного клиента снижается в 2 раза увеличивая дополнительную прибыль в 250 000 рублей.

Литература

1. Как снизить CPA на 76%? — URL: <https://ppc.world/articles/cpa-avtsgenerirovannyh-video-v-vk-reklame-na-76-nizhe-chem-u-bannerov-keys-po-prodvizheniyu-bankovskogo-produkta> (дата обращения: 08.11.2025).

Д.О. Жук, студ.;

рук. И.С. Андрюшина, д.эк.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УЧЕТ, ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕДИТНЫХ РИСКОВ НА ПРИМЕРЕ ЛИЗИНГОВОЙ КОМПАНИИ

В нынешних реалиях лизинг является одним из наиболее эффективных способов расширения средств компании. Это вызвано высокими ставками кредитования, санкционными ограничениями и прочего в сочетании с государственным субсидированием и мерами поддержки отечественного автопрома. При этом, общей проблемой лизинговой отрасли является увеличение дефолтных сделок и рост объема дебиторской задолженности. Такая тенденция обусловлена снижением платежеспособности клиентов, отсутствии свободных денежных средств для покрытия своих обязательств, мошенничеством и прочими факторами.

Авторами было проанализировано, что, для заключения сделок ответственные департаменты лизинговой компании принимают решения, основываясь на анализе отдельно финансового положения клиента, и отдельно дилера поставляемого предмета лизинга. Лизинговая компания является посредником между поставщиком транспортного средства и потенциальным лизингополучателем, поэтому необходимо внедрение модели, учитывающей и формирующей общую картину по каждой лизинговой сделке. Таким образом, для создания такого интегрального показателя авторами предлагается использовать три составляющих: вероятность дефолта, риск сотрудничества с поставщиком и наличие свободного денежного потока клиента на погашение обязательств по лизингу.

Для определения вероятности банкротства авторами рекомендуется использовать методику Р. Лиса, скорректированную под лизинговую деятельность: строки, содержащие информацию об активах лизингополучателя скорректировать на сумму используемого ей лизингового имущества, поскольку компании оно не принадлежит, заемный капитал изменить на задолженность по лизингу, а собственный капитал, в свою очередь, — на фактическую нераспределенную прибыль. Расчет нераспределенной прибыли зависит от расчета фактической чистой прибыли. Так как на размер чистой прибыли и налог на прибыль влияют лизинговые платежи и амортизация (в составе расходов), то предлагается ввести ручную корректировку строки 2400 на соответствующие расходы. На основе полученного результата (Z) присвоить балльное значение.

При расчете риска поставщика (Sup) авторами предлагается использование рейтинговой системы, где происходит оценивание поставщика по критериям, а возможность сотрудничества определяется большим количеством совпадений.

Для расчета третьей составляющей авторами используется скорректированный подход определения свободного денежного потока лизингополучателя для кредиторов, который будет учитывать потенциальные денежные средства клиентов на оплату лизинговых обязательств: налоговые вычеты, которые также могут быть направлены на погашение инвестиций по договору лизинга. Прежний подход ограничивал лизинговую компанию в расширении клиентской базы в условиях сокращения количества заключенных договоров. Результатом сравнения является отношение свободного денежного потока с учетом налоговой выгоды клиента (FCFD)

к сумме лизингового платежа за аналогичный период (Cn). Далее такой результат приводится к стандартизированному виду на основе ранжирования. Итоговый расчет интегрального показателя (R) выглядит следующим образом:

$$R = 0,5 \cdot Z + 0,3 \cdot (FCFD/Cn) + 0,2 \cdot Sup \quad (1)$$

где Z — балльное значение рассчитанной вероятности дефолта; FCFD/Cn — результат ранжирования платежеспособности клиента; Sup — присвоенный уровень риска поставщика.

На основе полученного показателя авторы предлагают каждой лизинговой сделке присваивать классификатор риска. Они представлены в таблице 1:

Таблица 1. Классификация риска лизинговой сделки на основе интегрального показателя

Интегральный рейтинг (R)	Уровень риска лизинговой сделки	Присвоенный классификатор
8,0–10	Низкий	A
6,0–7,9	Средний	B
3,0–5,9	Высокий	C
≤ 2,9	Критический	D

Разработанные предложения оказывают косвенное влияние на финансовую отчетность компании посредством управленческих решений. Для определения эффективности целесообразности их внедрения в управленческий учет компании авторами был произведен опрос 10 экспертов. По итогам опроса ими были сформулированы следующие выводы: все эксперты оценили эффективность разработанной модели в сфере снижения количества дефолтов, что позволяет лизинговым компаниям, сохранить «хороших» клиентов, а по высоко рисковым сделкам получить дополнительное обеспечение для снижения потенциальных убытков; за счет внедрения предложенной модели, компания сможет более полно и точно определять необходимый резерв на покрытие просроченной дебиторской задолженности, снижая налоговые риски и повышая прозрачность своей отчетности; 80% экспертов посчитали, что модель обеспечивает стандартизацию оценки рисков, что повышают оперативность и четкость в принятии решений.

Таким образом, полученные результаты показали, что разработанная авторами модель позволит лизинговым компаниям учитывать комплексные риски по каждой сделке и обеспечит возможность агрегирования информации для сбора статистики и определения тенденций, а значит и принятие эффективных и стратегически верных управленческих решений.

М.А. Баннова, студ.; рук. И.Е. Ларина, к.э.н., доц.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ОЦЕНОЧНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ

Оценочное обязательство — это существующая обязанность организации, возникающая из прошлых событий, с неопределенным сроком исполнения или неопределенной величиной, погашение которой, как ожидается, приведет к выбытию ресурсов, содержащих экономические выгоды [1].

Достоверная оценка оценочных обязательств напрямую влияет на качество финансовой отчетности, обеспечивая корректное отражение будущих расходов и предотвращая риски существенных финансовых потерь. На данный момент оценочное обязательство зачастую рассчитывается как дисконтированная сумма наиболее вероятных расходов. При таком подходе используются точечные оценки вместо вероятностных, ставка дисконтирования не учитывает специфические риски обязательства, игнорируется корреляция между различными обязательствами.

В качестве усовершенствованного подхода предлагается следующая методика, основанная на многовариантном моделировании с учетом вероятностных сценариев:

$$OO = \frac{[\sum (S_i \times P_i)] \times K_r}{(1+r+r_s)^t}, \quad (1)$$

где: S_i — сумма по i -му сценарию; P_i — вероятность сценария ($\sum P_i = 1$); K_r — коэффициент корреляции с другими обязательствами; r — ставка дисконтирования; t — срок исполнения; r_s — рискованная премия для данного типа обязательства.

Предлагаемая методика включает взвешенную оценку по различным сценариям с учетом их вероятностного распределения, введение рискованной премии, отражающей специфику конкретного типа обязательства, а также применение корректирующего коэффициента, учитывающего взаимосвязи между различными обязательствами. Такой подход позволяет преодолеть ограничения традиционных методов и обеспечивает более обоснованное определение величины оценочных обязательств.

Реализация предложенной методики позволит существенно повысить достоверность финансовой отчетности.

Литература

1. **Международный стандарт финансовой отчетности (IAS) 37** «Оценочные обязательства, условные обязательства и условные активы» (введен в действие на территории Российской Федерации приказом Минфина России от 28.12.2015 N 217н) (ред. от 17.02.2021) // Официальный сайт Минфина России <http://www.minfin.ru/>, 10.11.2025.

Д.Х. Каранфил, асп.;
рук. И.С. Андрюшина, к.э.н., профессор (НИУ «МЭИ»)

ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ТЭК

Стремительное развитие цифровых технологий и переход к цифровой экономике в значительной степени меняют основу технологического прогресса, требуя пересмотра концептуальных подходов к структуре интеллектуального капитала (ИК). Классическая теория ИК, которая включает человеческий, структурный и клиентский капитал, демонстрирует свою ограниченность применительно к технологически сложным и капиталоемким отраслям, таким как топливно-энергетический комплекс (ТЭК) [1].

Таблица 1. Инвестиции в цифровые технологии ТЭК, млн. руб.

2021	2022	2023	Среднегодовой темп роста
77 135	83 912	106 295	17,4%

(составлено автором по данным федеральной службы государственной статистики)

Динамика инвестиций в цифровые технологии, представленная в таблице 1, свидетельствует о формировании качественно новой технологической среды в топливно-энергетическом комплексе. В этих условиях цифровые активы и технологии становятся ключевыми источниками создания стоимости, формируя принципиально иную конфигурацию факторов производства.

Интеллектуальные ресурсы, возникающие в процессе цифровизации, имеют принципиально иные свойства по сравнению с традиционными формами капитала. Ценность таких ресурсов заключается в их способности трансформировать бизнес-процессы и создавать синергетический эффект, который невозможно описать в рамках существующей теории интеллектуального капитала. Это приводит к растущему несоответствию между классической теорией ИК и вызовами цифровой эпохи.

Учитывая выявленные изменения, существует необходимость пересмотра теоретических основ концепции интеллектуального капитала, что предполагает выявление новых структурных элементов с целью оценки и эффективного управления интеллектуальными ресурсами энергетических компаний. Что является ключевым условием обеспечения их устойчивого инновационного развития в условиях цифровизации.

Литература

1. **Перес Иснага Леонель.** Управление интеллектуальным капиталом компаний в цифровой экономике // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2022. № 1. С. 43–49 с.

*Т.С. Абсаямова, Е.С. Корявченков, студенты;
рук. Д.В. Никифорова, ст.преп.*

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК

Современные цепочки поставок характеризуются сложностью, недостаточной прозрачностью и доверием между участниками, что приводит к проблемам с отслеживаемостью, контрафактной продукцией, длительными сроками сверки данных и высокими транзакционными издержками. Эти вызовы требуют внедрения инновационных технологий, способных обеспечить новое качество управления. Блокчейн рассматривается как одна из ключевых технологий, способная кардинально трансформировать логистику [1].

Целью данного исследования является комплексный анализ потенциала технологии блокчейн для повышения эффективности, прозрачности и безопасности управления цепочками поставок, а также выявление ключевых перспектив и барьеров ее практического применения.

Объектом исследования выступают процессы управления в цепочках поставок, а предметом — механизмы и эффекты от применения блокчейн-технологии для их оптимизации.

Анализ показал, что интеграция блокчейна в управлении цепочками поставок позволяет создать единый, надежный и доступный в режиме реального времени реестр для всех участников цепи (поставщики, производители, логистические операторы, ритейлеры). Это преобразует традиционную линейную цепочку в децентрализованную сеть равноправных участников.

Таким образом, в результате исследования было определено, что блокчейн-технология обладает значительным трансформационным потенциалом для управления цепочками поставок, предлагая путь к созданию более прозрачных, безопасных и эффективных логистических экосистем. Однако ее успешное внедрение требует не только технологических доработок, но и преодоления организационных, нормативных и экономических барьеров. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на разработке моделей гибридных решений, стандартизации и анализе пилотных проектов для оценки реальной экономической эффективности технологии.

Литература

1. **Самойлов А.В., Молчанова С.М.** Применение технологий блокчейн в управлении цепочкой поставок продукции // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2021. — Т. 3, № 9(117). — С. 44–49. — DOI 10.36871/ek.up.p.r.2021.09.03.008.

У.С. Шишкина, студ.; рук. О.Г. Коновалова, ст. пр. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ МАЙНИНГА КРИПТОВАЛЮТ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОРЫНКИ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВЫГОДЫ И СИСТЕМНЫЕ РИСКИ

Активное развитие технологии блокчейн и распространение криптовалют привело к росту майнинга — деятельности по созданию новых структур для обеспечения функционирования криптовалютных платформ. В данном процессе используются майнинг-фермы, которые обладают значительными вычислительными мощностями и, как следствие, используют большой объем электроэнергии.

Цель исследования — проанализировать, как майнинг криптовалют влияет на энергетику в разных регионах, выявить потенциальные выгоды и системные риски.

В ходе анализа было установлено, что с одной стороны, майнинг-ферма является идеальным клиентом для энергетических компаний. Она работает круглосуточно, потребляет много и стабильно, не требует перерывов. Для энергосистем это очень предсказуемая и большая нагрузка, которая позволяет потреблять излишки электроэнергии и обеспечивать дополнительный доход генерирующим компаниям [1].

С другой стороны, существуют значительные системные риски. Майнинг — это непостоянный процесс, который создает хаос для энергетических компаний, которым сложно планировать, сколько энергии производить. Бесконтрольное подключение майнинг-ферм к сетям, мощность которых рассчитана на выполнение «базовых» задач приводит к резкому росту электропотребления, перегрузке сетей и увеличению риска аварийных отключений [2].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что влияние майнинга криптовалют на локальные энергорынки носит противоречивый характер. Потенциальные выгоды в виде монетизации избыточной энергии и стабилизации сетей могут быть реализованы только при условии продуманного государственного регулирования, интеграции майнинга в общую энергетическую стратегию и его ориентации на использование возобновляемых источников энергии. В противном случае, данная деятельность будет усугублять системные риски и создавать угрозы для энергетической безопасности регионов.

Литература

1. Официальный сайт КонсультантПлюс — [Электронный ресурс] — https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/
2. Официальный сайт Справочная медиа точка банк [Электронный ресурс] — <https://allo.tochka.com/>

А.А. Грачева, студ.; рук. Д.В. Никифорова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ХЕДЖИРОВАНИЯ В КОМПАНИИ HENDERSON

Современный российский fashion-ритейл развивается в условиях высокой волатильности валютных курсов и макроэкономической неопределенности, что особенно важно для компаний с высокой долей импортной составляющей в себестоимости [1]. Henderson, один из лидеров рынка мужской одежды с сетью из 167 салонов, значительную часть затрат формирует за счет поставок из Италии, Турции, Китая и Кореи. Это делает компанию чувствительной к колебаниям курсов и процентных ставок, а сохраняющая ручные элементы система управления рисками замедляет выявление угроз и повышает вероятность ошибок в расчетах [2].

Внедрение цифровых инструментов хеджирования, включающих аналитические платформы, мониторинг в реальном времени и модули предиктивного анализа, позволяет в едином информационном пространстве идентифицировать валютные, процентные и кредитные риски и оперативно подбирать стратегии защиты. Это повышает скорость управленческих решений, улучшает качество контроля, обеспечивает прозрачность и надежность финансового планирования, снижая потери от неблагоприятной рыночной динамики и укрепляя конкурентные позиции предприятия.

Экономическая оценка проекта для Henderson показывает его результативность: по прогнозным данным рассчитаны положительный чистый приведенный доход (NPV), внутренняя норма доходности (IRR) выше требуемого уровня и приемлемый период окупаемости инвестиций. Анализ чувствительности и стресс-тестирование подтверждают устойчивость ключевых показателей даже при неблагоприятных сценариях, что обосновывает целесообразность инвестиций в цифровизацию управления рисками.

Переход к цифровой модели хеджирования обеспечивает Henderson не только снижение потерь и оптимизацию затрат, но и стратегические преимущества: укрепление рыночных позиций, повышение маржинальности, улучшение кредитного рейтинга и формирование основы для долгосрочного устойчивого роста, а предложенный подход может быть адаптирован другими предприятиями отрасли.

Литература

1. Официальный сайт компании Henderson. URL: <https://ir.henderson.ru/>
2. Официальный сайт компании Henderson// Бизнес-модель. URL: https://ir.henderson.ru/business_model

Н.О. Немыкин, студ.; рук. О.Г. Коновалова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ МАРКЕТПЛЕЙСОВ НА РАЗВИТИЕ МАЛОГО И СРЕДНЕГО БИЗНЕСА В РОССИИ

В современных экономических условиях, маркетплейсы стали ключевым инструментом развития субъектов малого и среднего предпринимательства (МСП), оказывая комплексное влияние на их бизнес-процессы.

Актуальность темы исследования обусловлена стремительным ростом российского рынка маркетплейсов, что вызывает необходимость изучения их воздействия на развитие малого и среднего бизнеса. По данным Ассоциации компаний интернет-торговли (АКИТ), объем рынка интернет-торговли в 2024 году превысил 8,9 трлн рублей, при этом доля маркетплейсов составляет 62,8%. Более 75% продавцов на маркетплейсах в России были зарегистрированы в качестве ИП [1]. Для многих предпринимателей маркетплейсы становятся «точкой входа» в онлайн-торговлю, позволяя с минимальными издержками получить доступ к многомиллионной аудитории потребителей.

Целью исследования является анализ влияния маркетплейсов на развитие МСП в России. В ходе работы решались следующие задачи: выявление ключевых преимуществ и новых возможностей для бизнеса, а также систематизация основных проблем и рисков, связанных с работой на данных площадках.

В процессе анализа автором было выявлено, что к ключевым преимуществам работы с маркетплейсами можно отнести: снижение барьеров для входа на рынок за счет делегирования логистики, маркетинга и клиентского сервиса, повышение доверия потребителей через ассоциацию с брендом площадки, доступ к аналитическим инструментам для оптимизации бизнес-процессов.

Автором также были систематизированы основные риски: высокая конкуренция и «война цен», снижающая маржинальность, зависимость от изменений правил площадок, ограниченные возможности для построения собственного бренда и прямой коммуникации с потребителями.

Таким образом, маркетплейсы являются катализатором развития МСП, обеспечивая быстрый старт и масштабирование бизнеса. Для достижения долгосрочной устойчивости предпринимателям рекомендована диверсификация каналов сбыта и развитие собственных брендов при стратегическом использовании возможностей маркетплейсов.

Литература

1. Данные Ассоциации компаний интернет-торговли (АКИТ). 2024.

Е.Д. Петрова, студ.; рук. Д.А. Смирнова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПАО «ВУШ ХОЛДИНГ» И ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ЛИДЕРСТВА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Для компании «Вуш Холдинг» в условиях растущей конкуренции на рынке проката электросамокатов критически важно укрепить свои позиции. Чтобы оставаться лидером, необходимо разработать и внедрить эффективную стратегию цифровой трансформации [1].

Исследование рынка показало, что традиционные способы конкуренции (цена, география) уже недостаточны. Пользователи ожидают большего: удобства, технологичности и дополнительных сервисов. Существующая бизнес-модель ПАО «ВУШ ХОЛДИНГ» не полностью отвечает этим новым требованиям. Сравнительный анализ с конкурентами выявил необходимость изменений не только в технологиях, но и в подходе к управлению парком самокатов и обслуживанию клиентов.

В рамках работы предложена концепция, направленная на повышение конкурентоспособности. Она включает в себя: умную систему управления парком, а именно прогнозирование спроса, оптимизация перемещения самокатов, автоматизированное обслуживание; улучшенное мобильное приложение, персонализированные тарифы. Особое внимание следует уделить развитию партнёрской сети с городскими службами и транспортными компаниями, что позволит расширить спектр предлагаемых услуг и повысить удобство для пользователей. Внедрение инновационных решений в области искусственного интеллекта и машинного обучения поможет компании предвидеть тренды рынка и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям, обеспечивая тем самым долгосрочное лидерство в отрасли.

Анализ конкурентной среды и мирового опыта показывает, что будущее за созданием интегрированной мобильной экосистемы. Для ПАО «ВУШ ХОЛДИНГ» разработаны конкретные шаги по технологической трансформации, определены роли участников рынка и предложены показатели для оценки прогресса. Реализация этих планов позволит компании укрепить свои позиции на рынке и обеспечить устойчивый рост в условиях цифровизации городской мобильности.

Литература

1. Скиперская Е.В., Вайцеховская С.С., Довготько Н.А., Токарева Г.В. Теоретические и практические основы повышения конкурентоспособности предприятия в условиях цифровизации: учебное пособие // Ставропольский государственный аграрный университет, 2023.

В.С. Власова, студ.; рук. Д.А. Смирнова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ООО «ТЕХКОМПРО» И ПУТИ ЕЁ ПОВЫШЕНИЯ

В эпоху глобализации и стремительно меняющихся потребительских предпочтений понятие конкурентоспособности вышло далеко за рамки простого сравнения цен. Сегодня это комплексный показатель, определяющий не только текущее положение компании на рынке, но и ее долгосрочные перспективы выживания и роста. Успешная конкуренция требует от предприятий гибкости, адаптивности и постоянного совершенствования всех аспектов своей деятельности — от управления цепочками поставок до построения долгосрочных отношений с клиентами [1].

В результате проведенного всестороннего анализа компании, такого как анализ внутренней среды (включая SWOT-анализ) и внешней среды (включая PEST-анализ, модель пяти сил Портера и матрицу БКГ), была проведена оценка конкурентоспособности компании и ее продукции, а также рассчитаны ключевые финансовые показатели. На основе полученных данных было выяснено, что компания обладает средним уровнем конкурентоспособности. Основными выявленными проблемными зонами являются: недостаточно эффективное использование цифровых каналов продвижения, относительная слабость бренда на фоне ключевых конкурентов, а также возможности для оптимизации операционных затрат.

В рамках работы предложена концепция, направленная на повышение конкурентоспособности. Она включает в себя: оптимизацию операционной деятельности, усиление маркетинговых коммуникаций, развитие цифровых технологий, улучшение клиентского сервиса. Особое внимание стоит уделить развитию цифровых технологий, которое состоит из: модернизации веб-сайта компании, внедрения CRM-системы для улучшения управления взаимодействием с клиентами и анализа их поведения.

Таким образом, можно сделать вывод, что улучшение цифровых технологий приводит к увеличению конкурентоспособности компании. Реализация предложенного плана действий, основанного на глубокой диагностике, позволит ООО «Техкомпро» системно подойти к повышению своей конкурентоспособности и перейти из категории компании со средним потенциалом в категорию лидера или сильного претендента на своем рыночном сегменте.

Литература

1. **Фатхутдинов, Р.А.** Конкурентоспособность: Экономика, стратегия, управление: Учебное пособие / Р.А. Фатхутдинов. — Москва: Инфра-М, 2000. — 312 с.

Секция 31
ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Industrial economics

Председатель секции: к.т.н., доцент Курдюкова Галина Николаевна

Секретарь секции: к.т.н. Коломиец Юлия Георгиевна

Л.П. Курцев, студ.; рук. Д.А. Смирнова, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Обеспечение эффективного удовлетворения потребности в энергии играет центральную роль в развитии энергетических систем, при этом основное внимание уделяется снижению общего потребления энергоресурсов. Традиционная модель раздельного производства электричества и тепла не оптимальна с точки зрения эффективности, поэтому всё большую популярность получает когенерация — процесс комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Конкурентоспособность поставщиков когенерационного оборудования играет ключевую роль при принятии решений об инвестициях и формировании долгосрочных деловых отношений.

Конкурентоспособность предприятия отражает его способность удовлетворить конкретные потребности в сравнении с аналогичными предложениями на различных сегментах рынка [1]. Однако отсутствие учёта отраслевой специфики энергетики является одной из основных проблем в определении конкурентоспособности в данной области [2].

Цель работы заключается в совершенствовании методического подхода к оценке конкурентоспособности производителей когенерационного оборудования с учётом факторов цифровой трансформации.

Объектом данного исследования являются предприятия-производители когенерационных установок.

Предметом исследования выступают методы оценки и повышения конкурентоспособности промышленных предприятий в условиях цифровизации.

В работе будет предложена модифицированная модель оценки конкурентоспособности, учитывающая особенности энергетической отрасли, а также включающая показатели цифровой зрелости предприятия, уровень автоматизации производственных процессов.

Полученный метод может быть использован при формировании стратегии цифрового развития предприятий энергетического машиностроения, а также в процессе оценки эффективности внедрения цифровых технологий в производственную и управленческую деятельность.

Литература

1. **Баумоль, У.Дж.** Микротекория инновационного предпринимательства. — М.: Изд-во Института Гайдара, 2013. — 432 с.
2. **Чеботарева, Г.С.** Методические основы оценки конкурентоспособности энергетических компаний. М: Экономика региона, 2018. — 190–201 с.

В.Н. Акимов, асп.;
рук. А.Ю. Амелина, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

АДАПТАЦИЯ ОПЫТА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ГЕРМАНИИ, ЮЖНОЙ КОРЕИ И КИТАЯ К УСЛОВИЯМ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Анализ реализации импортозамещения в России демонстрирует существенные достижения. За последние годы объем льготного кредитования вырос на 45%, что стимулировало развитие производства. Увеличение субсидий на НИОКР на 30% способствовало повышению локализации производства до 65%. Создано 15 ОЭЗ и реализовано более 200 импортозамещающих проектов. Снижение налоговой нагрузки для производителей критически важного оборудования простимулировало развитие отечественного производства [4].

Исследование показало, что успешные модели импортозамещения Германии, Юж. Кореи и Китая базируются на комплексном подходе к развитию промышленности. Каждая страна сформировала собственную стратегию: Германия сделала акцент на высоких технологиях и образовании, Южная Корея — на приоритетных отраслях и государственном участии, Китай — на привлечении инвестиций и создании особых экономических зон [1–3].

Для повышения эффективности адаптации зарубежного опыта импортозамещения в РФ необходимо создать комплексную систему мер, включающую совершенствование межведомственного взаимодействия, расширение финансовой поддержки приоритетных отраслей, развитие кадрового потенциала и технологической инфраструктуры. Особое внимание следует уделить развитию экспортного потенциала отечественных производителей и созданию системы оценки эффективности реализуемых мер поддержки, что позволит обеспечить технологический суверенитет страны в стратегически важных отраслях.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования механизмов поддержки производителей и разработки региональных программ импортозамещения.

Литература

1. **Germany — Digital Strategy** 2025. Digital Skills and Jobs Platform. 2021.
2. **Onetti A.** Why South Korea will lead the AI revolution. Global Venturing. 2023.
3. **Digital Transformation:** Opportunities and Challenges for German Companies. InHunt World. 2023.
4. **Минпромторг РФ.** Программа поддержки высокотехнологичных производств, 2023. URL: https://minpromtorg.gov.ru/subsidies/2023_report.pdf

С.С. Кудина, студ.; рук. Е.И. Рукина, доцент, к.э.н. (НИУ «МЭИ»)

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ
КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ
НА ПРИМЕРЕ ООО «9 ЯНВАРЯ»**

В работе исследуется внедрение технологии компьютерного зрения (КЗ) в производственные процессы стекольного завода ООО «9 Января». Компьютерное зрение представляет собой инструмент цифровизации, позволяющий автоматизировать контроль качества, повысить производительность и снизить уровень брака в современных условиях высокой конкуренции.

Теоретическая часть охватывает этапы развития КЗ и ключевые технологии, а также мировой и российский рынок. Аналитический раздел содержит анализ текущих производственных процессов на предприятии. Практическая часть демонстрирует экономическую целесообразность внедрения КЗ. Целью работы является системный анализ внедрения КЗ в процессы предприятия для оценки экономического эффекта.

Основными проблемами являются человеческий фактор, простой оборудования, недостаточный уровень цифровизации. Работа содержит обоснование необходимости цифровизации, финансовые и производственные расчёты, подтверждающие эффективность внедрения.

Таблица 1. Основные экономические показатели до и после внедрения КЗ

Показатель	До внедрения (2023 г.)	После внедрения (2024 г.)	Изменение
Выручка (тыс. руб.)	1 326 409	1 449 677	123 268
Уровень брака (%)	3%	1%	-2%
Потери от брака (тыс. руб.)	39 000	13 000	-26 000
Простои оборудования (ч./год)	240	40	-200
Производительность (бут./год)	10 000 000	11 151 360	1 151 360
Себестоимость (тыс. руб.)	1 154 437	1 287 354	132 917

Анализ представленных данных показывает, что внедрение КЗ на предприятии ООО «9 Января» приводит к существенному улучшению как производственных, так и финансовых показателей. После внедрения ожидается снижение брака на 25–40%, рост производительности, сокращение затрат на оплату труда и простоев. Срок окупаемости проекта — 2 года, ЧДД — 5 666 тыс. руб., ВНД превышает ставку дисконтирования. Это подтверждает экономическую эффективность и целесообразность внедрения технологии.

Литература

1. Дэвенпорт Т. Внедрение искусственного интеллекта в бизнес-практику: Преимущества и сложности / Томас Дэвенпорт; Пер. с англ. — М.:Альпина Паблишер, 2021. — 316 с.

А.А. Белова, асп.; рук. И.С. Андрюшина., к.э.н., проф. (НИУ МЭИ)

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Энергомашиностроение, как отрасль с длинными инвестиционными циклами и высокой капиталоемкостью, сталкивается с необходимостью адаптации к скорости изменений, задаваемой современной экономикой. Классические теории инноваций, основанные на линейной модели (НИОКР → производство → рынок), уступают место сетевым и экосистемным подходам. Эволюция требований рынка приводит к смещению акцентов в структуре инновационного потенциала предприятия [1].

Таблица 1. Эволюция компонентов инновационного потенциала

Традиционный компонент	Цифровой компонент	Ключевое изменение
Научно-исследовательские лаборатории	Цифровые двойники (Digital Twins), симуляции	Сокращение времени и стоимости испытаний
Патенты и конструкторская документация	Big Data, алгоритмы машинного обучения	Данные становятся источником инновационных идей
Внутренние инженерные команды	Экосистемные партнеры (стартапы, вузы, IT-компании)	Открытые инновации
Иерархическая структура управления	Сетевые, проектные команды	Скорость и гибкость принятия решений

Произошло смещение акцентов от управления внутренними, преимущественно материальными ресурсами к управлению потоками знаний, данных и взаимоотношениями в рамках открытой экосистемы.

Эволюция компонентов инновационного потенциала демонстрирует четкий вектор движения от осязаемых, физических ресурсов к нематериальным, цифровым и сетевым активам. Если в индустриальную эпоху конкурентное преимущество строилось на масштабе производства и контроле над ресурсами, то сегодня оно определяется скоростью обучения, способностью к адаптации и позицией в глобальной инновационной экосистеме. Для современного предприятия стратегической задачей, ведущей к росту его стоимости, становится не накопление ресурсов, а развитие способностей к их эффективной интеграции и комбинации в постоянно меняющейся цифровой среде.

Литература

1. Егорова, А.А. Структурный подход к оценке инновационной активности предприятия / А.А. Егорова, Ю.Г. Мальцев, Д.А. Труханов, А.О. Ужegov // Вестник Челябинского государственного университета. — 2020. — № 2 (436). — С. 219–226. DOI: 10.24411/1994-2796-2020-10222.

Л.Д. Бероян, студ.; рук. Ю.Г. Коломиец, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ: ПРОБЛЕМЫ, РИСКИ И ЗАДАЧИ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Современная энергетическая отрасль развивается в условиях усиления конкуренции, цифровой трансформации и усложнения регуляторной среды. Генерирующие компании сталкиваются с необходимостью повышения эффективности и снижения издержек при ограниченных ресурсах. В этой ситуации цифровизация становится ключевым фактором укрепления конкурентоспособности, однако её внедрение сопровождается значительными технологическими и институциональными барьерами [1].

Цель исследования — анализ проблем конкурентоспособности генерирующих компаний и определение роли цифровых технологий в их преодолении. На основе классических стратегических моделей (М. Портер, И. Ансофф, П. Дракер) и современных концепций цифровой энергетики установлено, что конкурентоспособность формируется преимущественно через способность компании интегрировать цифровые решения в производственно-управленческие процессы, а не только за счёт традиционных технико-экономических параметров.

Выявлено ключевое научное противоречие: потребность компаний в цифровизации (цифровые двойники, предиктивная аналитика, интеллектуальные системы управления) значительно опережает их реальные возможности. Высокая капиталоемкость генерирующих активов, износ оборудования, ограниченность инвестиций и медленная адаптация нормативной базы формируют устойчивый разрыв между потенциалом цифровых технологий и условиями их внедрения [2]. Дополнительные ограничения создаёт усложняющийся профиль отраслевых рисков — технологических, регуляторных, рыночных и цифровых.

Таким образом, основная проблема заключается в отсутствии комплексного механизма повышения конкурентоспособности, учитывающего специфику цифровой трансформации, институциональные ограничения и необходимость системного управления рисками. Разработка такого механизма представляет собой перспективное направление дальнейших исследований и обладает высокой практической значимостью для повышения эффективности российского электро-энергетического комплекса.

Литература

1. **Ескина Е.Г.** Инструменты оценки конкурентоспособности предприятий электроэнергетики // Экономика и управление. 2021.
2. **Капитонов А.В.** Цифровизация энергетики: риски и возможности // Энергетическая политика. 2022.

В.А. Кочарян, студ.; Н.Л. Кетоева, доцент (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОНДА ОПЛАТЫ ТРУДА ЧЕРЕЗ ВНЕДРЕНИЕ КРІ ДЛЯ ПРОФЕССОРСКО- ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА

В условиях бюджетных ограничений оптимизация ФОТ ВУЗа становится ключевой задачей. Внедрение системы КРІ для ППС трансформирует ФОТ в инструмент стратегического управления [2].

Внедрение КРІ-системы способствует оптимизации ФОТ за счет следующих механизмов:

- Дифференциация оплаты труда в зависимости от реального вклада сотрудника;
- Стимулирование выполнения стратегических задач университета;
- Снижение затрат на неэффективные виды деятельности;
- Мотивация ППС к повышению продуктивности.

Автором была проведена систематизация механизмов влияния КРІ и анализ практического опыта внедрения на примере ТюмГУ, включая количественную оценку эффективности.

Таблица 1. Сравнительные показатели эффективности ФОТ в ТюмГУ до и после внедрения КРІ

Показатели	До внедрения	После внедрения
Доля стимулирующих выплат в ФОТ	18%	42%
Доля НПП, выполняющих план по НИР	51%	89%
Объем НИР на 1 НПП, тыс. руб.	185	412

На основе анализа динамики показателей сделан вывод о системном положительном эффекте КРІ, который может быть адаптирован для других вузов. Рост стимулирующих выплат, публикационной и научной активности подтверждает повышение эффективности ФОТ. Репликация результатов позволяет верифицировать методики в разных условиях, способствует накоплению доказательной базы и совершенствованию инструментов управления. Внедрение КРІ позволяет повысить эффективность использования ФОТ на 20–25% за счёт перераспределения средств в пользу продуктивных сотрудников [1].

Литература

- Официальный сайт Тюменского государственного университета [Электронный ресурс] URL: <https://www.utmn.ru>
- Егоршин, А.П.** Мотивация трудовой деятельности: учеб. Пособие для студентов вузов по специальности 062100 «Упр. персоналом» / А.П. Егоршин. — Нижний Новгород: НИМБ, 2003. — 320 с: ил.

Д.А. Грищенко, студ.; рук. Д.В. Никифорова ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ ИОТ-РЕШЕНИЙ ДЛЯ АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД „ЭЛЕКТРОСТАЛЬ“»

АО «Металлургический завод „Электросталь“» в 2024 г. увеличило выручку до 34,2 млрд руб. и чистую прибыль до 6,2 млрд руб. (+19,45% и +17,92% соответственно) за счёт роста заказов на высокомаржинальные жаропрочные и нержавеющие сплавы. Одновременно предприятие сталкивается с резким ростом себестоимости (+24% за 2024 г.), внеплановыми простоями, значительным физическим и моральным износом основного оборудования, высоким энергопотреблением, перерасходом дорогих элементов шихты и острым дефицитом кадров [1]. Дальнейшее повышение эффективности традиционными методами близко к пределу, что делает внедрение промышленного Интернета вещей (IIoT) одним из способов сохранения конкурентоспособности и финансовых показателей, значительно превышающих отраслевые нормы.

Проанализировав «болевые точки» предприятия, предложен и обоснован целевой перечень из пяти взаимосвязанных IIoT-решений, напрямую устраняющий выявленные проблемы:

1. Система предиктивного обслуживания критического оборудования (датчики вибрации, температуры, энергопотребления);
2. Интеллектуальный энергомониторинг с расширением действующей АСКУЭ;
3. Автоматический контроль качества в реальном времени на базе машинного зрения;
4. Интеллектуальная поддержка операторов с использованием дополненной реальности и автоматическим контролем операций;
5. Система оптимизации расхода легирующих элементов через непрерывный мониторинг состава шихты и расплава.

Проведенная оценка показала, что при наличии на данном предприятии современной ERP/MES-инфраструктуры три решения из пяти могут быть реализованы в ближайшее время без полной замены устаревшего оборудования, а весь комплекс в совокупности образует практически готовый план поэтапного перехода предприятия к модели предиктивного производства Индустрии 4.0. Предложенный перечень может быть использован как типовое решение для других российских заводов полного цикла специальной металлургии.

Литература

1. АО «Металлургический завод „Электросталь“» // Официальный сайт АО «Металлургический завод „Электросталь“» URL: <https://elsteel.ru/>

*А.А. Бойков, аспирант;
рук. Ю.А. Назарова, к.э.н., доц. (РУДН, Москва)*

ПРОБЛЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ: ЭКОНОМИКО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ, ВЛИЯНИЕ НА ВНЕШНЮЮ ТОРГОВЛЮ И ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЗАКУПКИ

В настоящий момент времени отрасль производства электронных музыкальных инструментов (ЭМИ) в Российской Федерации находится в плохом состоянии, этому способствует множество факторов: отсутствие прямой государственной поддержки, отсутствие классификации и, соответственно, позиций в рамках государственных закупок.

Существуют различные классификации музыкальных инструментов, при этом чаще всего используют классификацию Хорнбостеля — Закса. ЭМИ и аудио оборудование принято разделять на множество различных классов, которые можно сгруппировать как: клавишные синтезаторы и органы; ритм- и ударные машины; сэмплеры, ромплеры и грувбоксы; MIDI- и специализированные контроллеры; модульные и рэксовые системы; студийно-сценические процессоры и мониторинг; DJ-оборудование; прочие и экспериментальные инструменты.

Однако в юридическом пространстве имеются свои классификации товаров и услуг. В настоящий момент времени в Российской Федерации ЭМИ представлены в товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД ЕАЭС) в разделе XVIII, группе 92 с кодами 9207, 9209, 9208 и соответствующими подпозициями. В общероссийском классификаторе продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2) ЭМИ представлены в классе 32.20 раздела «Изделия готовые прочие», а именно коды 32.20.1 и 32.20.2. При этом нет такого подробного деления ЭМИ как было указано выше. В этой связи отсутствует какая-либо статистика по конкретным позициям, производимым в Российской Федерации. Также ЭМИ, за исключением цифровых пианино, отсутствуют в каталоге товаров, работ, услуг для государственных нужд (КТРУ), что является причиной отсутствия всего спектра ЭМИ в государственных учреждениях. Эти учреждения не проинформированы про существование такого рода инструментов и в целом не могут осуществить государственную закупку тех или иных позиций в этой связи, что существенно влияет на рынок и возможность производства ЭМИ в России.

По этой причине необходимо разработать и внедрить обновленную классификацию ЭМИ, совместно с соответствующими государственными институтами и органами управления, в правовое поле Российской Федерации.

А.В. Поваляева, студ.; рук. Д.В. Никифорова, ст. пр. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ (IOT) НА ЭКОНОМИКУ В СФЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Внедрение IoT создает интеллектуальную саморегулируемую энергосистему, технологии которой прогнозируют спрос и обеспечивают гибкое управление нагрузкой через двустороннюю связь с потребителем. Это формирует устойчивую энергосистему, адаптированную к рыночной нестабильности и переходу на низкоуглеродную энергетику, снижая конечную стоимость электроэнергии.

Проведя анализ влияния интернета вещей на экономику в сфере энергетической промышленности, выявлено, что методики IoT позволят уменьшить число аварий благодаря своевременному и оперативному информированию о ненормативном режиме работы оборудования, и предсказательному ремонту и/или техническому обслуживанию [1]. Однако сложность интеграции систем затрудняет использование технологий. Необходимость использования различных датчиков и устройств затрудняет построение единой централизованной системы. Это создает технологические барьеры, повышает стоимость и сроки внедрения, препятствует созданию целостной управляемой экосистемы. Решением данной проблемы могут стать: 1) разработка и внедрение открытых стандартов и протоколов взаимодействия (принятие единых отраслевых стандартов и разработка технического регламента для всех поставщиков оборудования, включение в технические задания для поставщиков требований поддержки открытых стандартов); 2) использование платформенных решений (внедрение централизованной IoT-платформы для всех данных); 3) создание центра компетенций и обучения персонала основам IoT, работе с данными и аналитике.

В перспективе интеграция этих технологий позволит перейти к полностью автономным энергообъектам, где мониторинг, диагностика и принятие решений будут осуществляться в режиме реального времени без постоянного человеческого вмешательства, что кардинально повысит надежность энергоснабжения, минимизирует операционные расходы и создаст принципиально новый уровень промышленной безопасности [2].

Литература

1. Научная статья «Анализ перспектив применения технологии интернета вещей в электроэнергетической отрасли» Ю.А. Назарова, А.С. Корзин, А.С. Демидов <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektiv-primeneniya-tehnologii-interneta-veschey-v-elektroenergeticheskoy-otrasli>
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030» https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf

А.В. Абалуев, студ.; рук. Ю.Г. Коломиец, доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕХАНИЗМЫ МИНИМИЗАЦИИ ИЗДЕРЖЕК ЭНЕРГОКОМПАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Энергетический сектор России сталкивается с возрастающими требованиями к энергоэффективности, что делает модернизацию распределительных электрических сетей ключевым направлением развития в условиях цифровизации. Потери электроэнергии при передаче и распределении составляют около 11% полезного отпуска, что значительно превышает уровень ведущих зарубежных компаний (6–8%). Основными причинами являются высокий физический износ инфраструктуры [1], недостаточная автоматизация и низкая прозрачность процессов учёта. Более половины распределительных сетей выработали нормативный ресурс, а в ряде регионов (Сибирь, Дальний Восток) износ достигает 70–80%. Ситуация осложняется региональной неоднородностью: если Москва и Московская область демонстрируют высокий уровень цифровизации, то большая часть территорий страны по-прежнему работает на устаревших сетях с минимальным уровнем телеметрии и автоматизации, что увеличивает как технологические, так и коммерческие потери.

Основными центрами издержек являются затраты на компенсацию технологических потерь (доля которых в себестоимости достигает 15%) и расходы на техническое обслуживание и ремонты, обусловленные высоким износом фондов.

Технологические потери [2] обусловлены физическими характеристиками оборудования — сопротивлением линий, потерями в трансформаторах, реактивной мощностью, паразитными токами. Коммерческие потери формируются вследствие несовершенства учёта, несанкционированных подключений, ошибок расчётов и хищений электроэнергии. Наиболее уязвимым сегментом остаются сети 0,4–10 кВ, обслуживающие жилой и малый коммерческий сектор. Их низкий уровень автоматизации не позволяет оперативно выявлять аварии, перегрузки и небалансы, а также препятствует качественному прогнозированию нагрузки и эффективному планированию ремонтов. Несмотря на наличие пилотных проектов цифровизации (Татарстан, Белгородская область, Москва), их масштабы пока недостаточны для формирования единой цифровой архитектуры распределительных сетей.

Авторами был систематизирован опыт влияния цифровых технологий на эти издержки. Было установлено, что такие решения, как интеллектуальные системы учёта (АИИС КУЭ), позволяют целенаправленно бороться с коммерческими потерями, а системы SCADA и предиктивной аналитики — снижать технологические потери и оптимизировать затраты на ремонты, переходя к обслуживанию по фактическому состоянию.

Исследование показало, что, с одной стороны, существует острая экономическая потребность в снижении издержек и зрелый технологический инструментарий для ее решения в виде цифровизации. С другой стороны, масштабное внедрение этих технологий сдерживается системными барьерами: устаревшими, фрагментарными методиками оценки и планирования, а также регуляторной политикой, которая не создает достаточных стимулов для инвестиций в операци-

онную эффективность. Для разрешения данного противоречия в работе предлагаются механизмы минимизации издержек, которые включают:

1. Разработку комплексной модели управления затратами, которая позволяет оценивать не только прямые, но и косвенные системные эффекты от внедрения цифровых технологий на всю производственную цепочку.
2. Адаптацию регуляторных механизмов, в частности, переход к долгосрочным параметрам регулирования, которые бы мотивировали компании к снижению издержек, позволяя им сохранять часть достигнутой экономии.

Литература

1. **Кониковская Н.О.** Методические основы совершенствования управления издержками в энергокомпаниях на основе многофакторного интегрального анализа / Кониковская Наталья Олеговна. — Москва, 2006. — 20 с. — EDN NJVATR. (дата обращения: 05.05.2025);
2. **Савина Н.В., Гамолин В.А.** Разработка инструментария снижения потерь электроэнергии в распределительных сетевых комплексах // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2019. № 85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-instrumentariya-snizheniya-poter-elektroenergii-v-raspredelitelnyh-setevykh-kompleksah> (дата обращения: 05.05.2025);

М.И. Трефилова, студ.;
рук. Е.Ю. Абрамова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АТОМНОГО СЕГМЕНТА ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Критически важным направлением развития ТЭК является создание современной отрасли атомного энергомашиностроения, соответствующей принципам Индустрии 4.0.

Для определения приоритетов цифровизации необходима комплексная диагностика уровня цифровой зрелости атомного энергомашиностроения.

Существующие методологические подходы имеют не учитывают отраслевую специфику атомного сегмента, следовательно, возникает необходимость разработки модели оценки уровня цифровой зрелости, которая позволит систематизировать процесс цифровизации.

Разработанная модель имеет четыре области измерения: персонал и культура, стратегия компании, данные и аналитика, процессы и операции. Каждая область формирует ряд оцениваемых критериев, для примера, область «стратегия компании» измеряется следующими показателями: S_1 — цифровая стратегия, S_2 — участие в государственных инициативах, S_3 — организационная структура, S_4 — бюджет компании в области цифровизации, формула расчета для данной области:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot S_i \leq 1 \quad (1)$$

где: S — итоговый показатель области «стратегия компании (S)»; S_i — оценка i -го критерия стратегии; ω_i — весовой коэффициент i -го критерия, отражающий его относительную значимость ($\sum \omega_i = 1$); n — общее количество критериев в рассматриваемой области.

Итоговый уровень цифровой зрелости учитывает синергетический эффект рассматриваемых областей, определяется по формуле:

$$DM = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \omega_j \cdot D_j + \frac{1}{6} \sum_{j \neq k} \min(D_j, D_k) \leq 1 \quad (2)$$

где: DM — итоговый уровень цифровой зрелости предприятия; D_j — оценка j -й области измерения.

Данная модель позволит систематически отслеживать уровень цифровой зрелости предприятий атомного энергомашиностроения.

Литература

1. **Лепеш, Г.В.** Цифровая трансформация промышленного сектора экономики / 2022. — № 2(60). — С. 3–15. — EDN MODLLG.

С.Ю. Кожевников, студ.; рук. Ю.Г. Коломиец, доц. (НИУ «МЭИ»)

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Кибербезопасность энергетических компаний сегодня приобретает ключевое значение, поскольку цифровизация отрасли приводит к росту числа уязвимостей и повышает вероятность атак, способных вызвать сбои в работе критически важных объектов. Большинство кибератак выявляется слишком поздно, когда ущерб уже нанесён, что делает необходимым комплексный пересмотр подходов к защите энергетической инфраструктуры. На фоне глобальных киберугроз энергетические предприятия становятся одной из наиболее привлекательных целей злоумышленников, а обеспечение их стабильной работы напрямую влияет на экономическую и национальную безопасность.

В научной литературе и нормативных документах преобладает технический подход к обеспечению цифровой безопасности энергетики. Аналитический обзор литературы показал, что подчеркивается роль специализированных технических средств, нормативных требований и систем мониторинга, позволяющих предотвращать несанкционированный доступ и кибервоздействия. В ряде работ акцент делается на необходимости совершенствования правового регулирования и сертификации программного обеспечения, применяемого в сфере ТЭК, а также создания структур, обеспечивающих взаимодействие государства и бизнеса в вопросах информационной безопасности [1]. Отдельное направление исследований посвящено использованию искусственного интеллекта и интеллектуальных систем при мониторинге и обнаружении киберугроз.

Однако, наряду с техническими аспектами, авторы выделяют и важнейшее научное противоречие: преобладающие методы защиты оказались недостаточно эффективными в условиях стремительной эволюции угроз. Необходимо пересмотреть классические подходы к риск-менеджменту, дополнив их инструментами моделирования угроз, аналитическими системами реального времени и междисциплинарным взаимодействием специалистов. Важную роль играет и человеческий фактор: ошибки персонала становятся одним из основных векторов атаки, что требует усиления организационных и образовательных мер. Необходима комплексная оценка уровня кибербезопасности энергетической отрасли и формирование практических рекомендаций по её повышению. В рамках работы на основе нормативной базы, актуализированных угроз, представлена модернизированная методика расчета рисков энергопредприятия, с учетом кибербезопасности. Полученные выводы и предложенные решения станут основой для повышения устойчивости энергетического предприятия к киберугрозам, что особенно важно в условиях продолжающейся цифровизации и роста сложности атак.

Литература

1. **Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.** Кибербезопасность объектов электроэнергетики как фактор надёжности ЭЭС // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики: Сборник научных статей. Вып. 66.

В.И. Волкова., студ.;
рук. Е.И. Рукина, ст. преп., к.э.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИНЫ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В условиях цифровизации возникла необходимость решения ключевого противоречия в нефтегазовой отрасли: между растущими затратами на бурение (до 50% в себестоимости) и требованием их снижения. Несмотря на наличие систем сбора данных, отсутствуют эффективные алгоритмы для их анализа в реальном времени. Разработка методов машинного обучения для предиктивной оптимизации режимов бурения позволит преодолеть этот разрыв и обеспечит снижение затрат на 20–30%. [1]

Объектом исследования выступают процессы бурения скважин в Upstream-сегменте нефтегазового комплекса, порождающие проблему низкой эффективности и высоких рисков из-за устаревшей инфраструктуры и ручных методов управления, что приводит к затратам до 50% от общих расходов на проекты и увеличению экологических инцидентов.

Предметом исследования являются алгоритмы машинного обучения для анализа данных с датчиков в реальном времени и оптимизации параметров бурения (скорость, давление, крутящий момент), для снижения затрат и повышения производительности, учитывая глобальные тенденции декарбонизации и регуляторные требования.

Целью исследования является разработка и апробация алгоритма на основе машинного обучения, позволяющего оптимизировать режимы бурения и обеспечивающего снижение операционных затрат не менее чем на 10–15% за счёт увеличения скорости проходки и сокращения непроизводительных простоев.

В процессе работы был проведен анализ существующих методов оптимизации, разработан алгоритм на базе ML с использованием датасетов отрасли, рассчитаны ключевые метрики и предложены рекомендации по внедрению для повышения финансовой эффективности. Личный вклад автора заключается в разработке оригинального алгоритма, позволяющего снизить простои на 15% и повысить ROP на 25%, с экономическим эффектом в виде снижения затрат на бурение на 20%, подтвержденным симуляциями; новизна — интеграция федеративного обучения для конфиденциальности данных.

Литература

1. **Электронный ресурс:** о цифровизации в нефтегазовом секторе [Электронный ресурс] — режим доступа: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.

А.А. Сырцов, студ.; рук. Д.Э. Мусаева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Современное строительство энергетических объектов характеризуется возрастающей сложностью и капиталоемкостью на фоне активной цифровой трансформации отрасли. Традиционные системы оценки эффективности не учитывают отраслевую специфику, многомерность результатов, что создает необходимость в разработке новых подходов.

В качестве решения этой проблемы в статье предлагается модель комплексной оценки, основанная на системе взвешенных показателей. Модель была разработана с использованием методов системного анализа, синтеза и математического моделирования, а также критического анализа существующих подходов [1].

Основой модели является система из семи показателей, охватывающих ключевые аспекты проекта:

1. Показатель экономической эффективности (ПЭЗ).
2. Показатель соблюдения графика (ПСГ).
3. Показатель контроля дебиторской задолженности (ПДЗ).
4. Показатель рентабельности проекта (ПРП).
5. Показатель качества исполнения (ПКИ).
6. Показатель удовлетворенности проектной команды (ПУКП).
7. Показатель удовлетворенности клиентов (ПУЗ).

Для каждого показателя определены желаемые и предельные значения. На основе показателей рассчитывается интегральный показатель эффективности управления проектами (ПЭУП) по формуле:

$$\text{ПЭУП} = \omega_1 \cdot \text{ПЭЗ} + \omega_2 \cdot \text{ПСГ} + \omega_3 \cdot \text{ПДЗ} + \omega_4 \cdot \text{ПРП} + \omega_5 \cdot \text{ПКИ} + \omega_6 \cdot \text{ПУКП} + \omega_7 \cdot \text{ПУЗ} \quad (1)$$

где ω_i — весовые коэффициенты, отражающие относительную важность каждого показателя, полученные экспертным путём.

Преимуществом модели является ее многомерность, сочетающая в себе финансовые, временные, качественные и социальные аспекты. Модель адаптивна к условиям цифровизации, поскольку функционирует за счет агрегирования данных с цифровых платформ, обеспечивая сквозной мониторинг на всех этапах жизненного цикла проекта. Внедрение модели позволяет повысить обоснованность управленческих решений, прозрачность проекта.

Литература

1. Каплан Р.С. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / Р.С. Каплан, Д.П. Нортон. — М. : Олимп-Бизнес, 2003. — 320 с.

Секция 32

МЕНЕДЖМЕНТ

Management

Председатель секции: к.э.н., доцент Кетоева Наталья Леонидовна

Секретарь секции: Вольная Сима Агилевна

С.С. Молокова, студ.; рук. Е. Сотниченко, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ЦЕННОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЕНЕДЖМЕНТА В ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Химическая отрасль — это одна из главных отраслей промышленности Российской Федерации в настоящее время, которая включает в себя лекарства, бытовую химию, удобрения и многое другое. Также химическая отрасль способствует развитию многих жизненно-важных отраслей,

Но в ней существует главный недостаток — научно-технологический прогресс. Он развивается более высокими темпами, чем производственная деятельность самих предприятий. Компании не успевают внедрять новые технологии в процесс своего производства и из-за этого происходит не только снижение объема производства, но и уменьшение стоимости компаний. Поэтому данная проблема является актуальной — какие особенности будет иметь применение ценностно-ориентированного менеджмента на управление стоимостью предприятий в химической отрасли.

Несмотря на серьезный недостаток ценностно-ориентированный менеджмент имеет ряд преимуществ, поэтому в условиях введенных ограничительных мер на ресурсы, компании должны демонстрировать свою деятельность, как независимую от внешнего давления, то есть внедрять принципы устойчивого развития [1]. Ценностно-ориентированный менеджмент позволяет интегрировать эти принципы в стратегию компании, тем самым обеспечивая долгосрочную устойчивость и повышение стоимости компании.

Предприятия, которые основаны на ценностно-ориентированном менеджменте, ориентированы не только на увеличение стоимости компании, но и на развитие новых технологий, на формирование доверия сотрудников и клиентов, на повышение качества продукции. Это всё позволяет предприятиям быстро реагировать на меняющиеся потребности рынка и сохранять свою конкурентоспособность.

В результате анализа можно сделать вывод, что ценностно-ориентированный менеджмент позволяет предприятиям химической отрасли не только увеличивать стоимость компании, но и успешно функционировать в современном мире.

Литература

1. **Когденко, В.Г.** Управление стоимостью компании. Ценностно-ориентированный менеджмент: учебник для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «/Экономика», «Менеджмент» / В.Г. Когденко, М.В. Мельник. — Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2021. — 447 с. — (Серия «Корпоративная финансовая политика»).

А.В. Иванкова, студ.;
рук. М.В. Бузулуцкая, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ РУТИННЫХ ЗАДАЧ: РОЛЬ ИИ В ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА

Динамичное развитие бизнес-среды и высокая конкуренция обуславливают необходимость внедрения инновационных технологий, особенно искусственного интеллекта (ИИ).

Исследование показывает, что до 60% рабочего времени управленческого персонала тратится на рутинные операции: 35% уходит на обработку документации, 15% — на составление отчетов, по 10% — на планирование встреч и координацию коммуникаций. На Таблица 1 можно увидеть преимущества внедрения ИИ-решений.

Таблица 1. Преимущества внедрения ИИ-решений

Параметр	До автоматизации	После автоматизации
Скорость обработки данных	100 документов/час	1000 документов/час
Точность выполнения	85%	99%
Время на рутинные задачи	60% рабочего времени	15% рабочего времени

Организации, внедрившие ИИ-технологии, демонстрируют существенный рост эффективности: увеличение прибыли на 20–30%, ускорение управленческих процессов в 2–3 раза. Однако внедрение ИИ требует учета важных факторов: значительных начальных инвестиций, затрат на обучение персонала, обеспечения безопасности данных и решения этических вопросов [1].

В современных условиях использование ИИ в управленческих процессах становится не просто конкурентным преимуществом, а необходимым условием выживания бизнеса. Компании, игнорирующие эту тенденцию, рискуют потерять рыночные позиции.

Литература

1. **В.В. Филатов, В.Н. Женжебир, В.В. Кудрявцев, М.В. Бузулуцкая.** Применение инноваций в управлении мотивацией и технологиях набора и отбора персонала предприятий общественного питания. Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. — 2024. — № 3. — С. 20–30.

*Д.Р. Хабибулина, студ.;
рук. О.В. Колесникова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КАК ESG-КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЯЮТ ЦЕННОСТЬ БИЗНЕСА?

Нефинансовые показатели в настоящее время приобрели значительную роль в решении управленческих задач и ценности бизнеса на рынке. Количественные и качественные метрики, измеряющие деятельность компании за пределами финансовой отчетности, объединяют в структурированную и стандартизированную систему — ESG. Эта концепция включает три ключевых компонента: экологические, социальные и управленческие. Среди целей и стратегий предприятий появились такие понятия как “корпоративная социальная ответственность”, “сокращение выбросов” и “утилизация отходов”. ESG-факторы помогают держать под контролем данные аспекты, тем самым, формируя репутацию компании и ее положение на рынке. [2]

Компании, активно учитывающие ESG-критерии, лучше справляются с потенциальными инвестиционными рисками. Инвесторы обращают внимание на уровень ESG-рейтинга, тем самым спрос на акции может повыситься, так как положительные факторы дают заинтересованным лицам понять, насколько компания ответственна и устойчива, что способствует росту ценности предприятия. [1]

Ярким примером является АО «Полиметалл». В 2020 году компания привлекла первый «зеленый» кредит в горнодобывающем секторе России. Международный банк предоставил 125 млн долларов для финансирования проектов по переходу к устойчивой и низкоуглеродной экономике. Благодаря высоким ESG-рейтингам горнодобывающей компании ставка заемных средств была гораздо ниже стандартных рыночных предложений. В связи с этим, общая годовая экономия от данной сделки оценивалась примерно в 940 тыс. долларов. Это наглядно показывает положительное влияние ESG-факторов на финансовые показатели компании, стоимость капитала и ее ценность на рынке.

Поэтому важно внедрять в отчет качественную и количественную оценку устойчивости компании. Ведь в современном мире интеграция ESG-принципов в стратегию компании имеет не только модную тенденцию, но и практическую необходимость выполнения требований законодательства.

Литература

1. **Когденко В.Г.** Управление стоимостью компании. Ценностно-ориентированный менеджмент: учебник — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. — 447 с.
2. **Мясоедова, Т.Н.** Промышленная экология : учебное пособие / Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия. — Ростов-на-Дону; Таганрог, 2017. — 90 с.

А.А. Гапонова, студ.; рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ КОРПОРАТИВНОЙ КУЛЬТУРЫ КОРПОРАЦИЙ И МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Корпоративная культура является одной из ключевых категорий современной теории управления, представляя собой систему ценностей, норм и моделей поведения, разделяемых сотрудниками организации. Она оказывает влияние на эффективность взаимодействия, уровень мотивации, адаптивность и инновационность предприятия. Сильная корпоративная культура способствует внутренней стабильности, формированию единства целей и укреплению имиджа компании [1].

Особенности формирования корпоративной культуры во многом определяются масштабом и структурой организации. В малых и средних предприятиях она возникает естественным образом, на основе личных контактов, повседневного взаимодействия и примера руководителя. В таких организациях управленческие процессы отличаются гибкостью, отсутствием избыточной бюрократии и неформальным характером коммуникаций. Лидер играет ключевую роль — именно его ценности, установки и стиль поведения становятся основой корпоративной среды [2].

В крупных корпорациях корпоративная культура является частью стратегического управления. Здесь она формируется целенаправленно, через миссию, систему корпоративных ценностей, внутренние стандарты и программы обучения персонала. Развитие культуры поддерживается формализованными документами — кодексами поведения, этическими правилами, корпоративными брендами и коммуникационными политиками.

Таким образом, корпоративная культура в организациях любого масштаба является мощным нематериальным ресурсом, однако формы её проявления и методы управления различаются. Малый бизнес выигрывает за счёт гибкости и личной вовлечённости, тогда как крупные корпорации — за счёт системности и преемственности.

Литература

1. Шарков Ф.И., Гостенина В.И., Лоскутова И.М., Сычева Е.Ю. — «Корпоративная культура организации: управление социальным капиталом в условиях вызовов и рисков». Вестник РУДН. Серия: Социология, 2023, Т. 23, № 1, с. 142–155. DOI: 10.22363/2313-2272-2023-23-1-142-155.
2. Гуськова Н.Д. Влияние организационной культуры на повышение мотивации сотрудников малого предприятия / Н.Д. Гуськова, А.В. Ерастова, Т.В. Миронова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — №7 (145). — URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024july-undefined/10.60797/IRJ.2024.145.85> — DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.85.

Д.А. Рыжкин, студ.; рук. А.Г. Бадалова, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ДОКУМЕНТООБОРОТА В ГОСУДАРСТВЕННЫХ КОРПОРАЦИЯХ НА ПРИМЕРЕ ГК «РОСКОСМОС»

Цифровая трансформация государственного сектора требует ускорения и стандартизации процессов управления документами. Внедрение электронного документооборота (ЭДО) сокращает сроки обработки документов, повышает прозрачность и обеспечивает формирование единого информационного пространства. Актуальность исследования определяется задачами, обозначенными в Стратегии развития информационного общества [1] и проекте «Цифровое государственное управление» [2].

Для предприятий ракетно-космической отрасли, включая ГК «Роскосмос», цифровизация документооборота имеет особое значение из-за высокой регламентированности процедур. Методическую основу работы составляют положения ГОСТ Р ИСО 15489-1-2019 [3].

Новизна исследования состоит в разработке модели ЭДО, интегрируемой с системой 1С:ERP. Предложенный подход обеспечивает унификацию маршрутов согласования, снижение доли ручных операций и повышение управленческой прозрачности. Модель учитывает требования и особенности документооборота государственных корпораций.

В ходе работы проведён анализ внутренних регламентов ГК «Роскосмос», выявлены основные проблемы: дублирование операций, длительное согласование, отсутствие сквозной цифровой прослеживаемости. Предложены решения по автоматизации регистрации, согласования и архивирования документов. Сформированы RACI-роли и базовые метрики эффективности внедрения.

Ожидаемые результаты — сокращение сроков согласования документов, повышение исполнительской дисциплины и уменьшение числа регламентных ошибок. Разработанный подход масштабируется на организации отрасли и интегрирован в государственные цифровые платформы [2].

Литература

1. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203.
2. Федеральный проект «Цифровое государственное управление». Минцифры РФ, 2023.
3. ГОСТ Р ИСО 15489-1-2019. Управление документами. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2020.

*А.А. Кабанова, студ.;
рук. В.С. Панчева, к.э.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

BIM-ТЕХНОЛОГИИ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Цифровизация базовых бизнес-процессов в строительной отрасли — критически важная задача в условиях современной экономики, которая позволит оптимизировать затраты, повысить качество объектов капитального строительства (ОКС) и будет способствовать внедрению принципов экономики замкнутого цикла.

Технологии BIM являются основой рационального использования ресурсов. BIM (Building Information Modeling) — это процесс информационного моделирования зданий, который позволяет создавать и управлять цифровыми представлениями физических объектов. BIM-технологии позволяют на 30% сократить ошибки, гарантированно выявить пространственные неточности, ускорить проектирование на 25% и в 3 раза уменьшить время подготовки документации. Ключевое преимущество BIM заключается в выходе за рамки трехмерной визуализации. Модель обогащается такими параметрами, как временные графики (4D), стоимостные показатели (5D) и данные для последующей эксплуатации (6D) [1]. Подобная интеграция информации в едином пространстве дает возможность детально проанализировать будущий объект до начала строительных работ, автоматизировать расчеты и составление смет, что в итоге снижает риски, сроки и общую стоимость реализации проекта. Оценки, представленные ДОМ.РФ и Минстроем России, количественно подтверждают эффективность BIM: его применение позволяет сократить бумажный документооборот на 85%, сроки обработки документов — на 50%, а количество ошибок при проектировании — на 80% [2]. Эти цифры наглядно демонстрируют, как цифровизация напрямую влияет на снижение непроизводственных затрат и минимизацию рисков, что полностью соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

Литература

1. **Т.В. Горохова.** Обоснование необходимости использования BIM-технологий с целью повышения эффективности строительных процессов/ [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-neobhodimosti-ispolzovaniya-bim-tehnologiy-s-tselyu-povysheniya-effektivnosti-stroitelnyh-protsessov/viewer>
2. **Федеральный проект «Новый ритм строительства»** // Информационный ресурс «Национальные проекты» — URL:<https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/infrastruktura-dlya-zhizni/novyy-ritm-stroitelstva>

А.Д. Михеева, студ.;
рук. В.А. Епифанов, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛЬЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РИСКОВ НА ЭТАПЕ КОНЦЕПЦИИ

По данным Белова, 68% задержек в сдаче жилых объектов в РФ связаны с корректировками проектной документации уже в ходе строительства, вызванными недооценкой рисков на стадии концепции [1]. Традиционные методы оценки (check-листы, экспертные оценки) носят субъективный характер и не позволяют количественно прогнозировать влияние изменений на сроки и стоимость.

Необходимо выявить простой способ обнаружения «опасных» решений заранее. Чаще всего встречаются 4 типичных риска, вызывающие цепную реакцию корректировок:

- 1) конфликт между архитектурой и инженерными системами,
- 2) игнорирование требований эксплуатации (например, ремонтпригодности),
- 3) неучёт градостроительных ограничений,
- 4) изменение требований заказчика после утверждения концепции.

Опираясь на полученные выше факты, можно сделать вывод: если риск обычно приводит к трём и более корректировкам, его нужно ликвидировать ещё при обсуждении концепции: вовлекать инженеров, согласовывать с подрядчиками, проверять на BIM-модели. Если корректировок меньше двух — можно вынести проверку на более позднюю стадию.

Новизна подхода состоит в том, что он не требует сложных расчётов или специального ПО. Достаточно вести простой журнал: какое решение принято, кто участвовал, сколько правок оно в итоге вызвало. Со временем появляется понимание какие решения «дорого стоят», даже если кажутся безобидными.

Проверить работоспособность метода удалось на трёх проектах, где инженеры подключались уже к обсуждению эскиза. В них число корректировок сократилось почти вдвое. Это говорит о том, что эффект даёт не технология сама по себе, а раннее совместное обсуждение: когда проектировщик не чертит в одиночку, а сразу думает о реализации и эксплуатации.

Методику можно оформить как Excel-шаблон для проектировщиков: ввёл данные — получил карту рисков, а позже можно интегрировать в BIM-процесс.

Литература

1. **Белов, Е.А.** Современное состояние строительной отрасли России: тенденции, проблемы, перспективы // *Modern Economy Success*. 2025. № 1 — С. 33–41.

*К.А. Бейсенова, студ.;
рук. О.В. Колесникова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ: НА ПРИМЕРЕ КОМБИНАТА ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Для современных промышленных предприятий технологическое присоединение становится стратегической задачей, где ключевую роль играют цифровые решения. Опыт ведущих сетевых компаний показывает: внедрение единого окна и онлайн-сервисов уже дает значительный эффект — ускоряет процедуры и повышает прозрачность.

Однако настоящий прорыв в управлении этим процессом связан с созданием цифрового двойника энергосистемы предприятия. Эта виртуальная модель позволяет уже на стадии проектирования:

- Проводить многовариантное моделирование режимов электроснабжения
- Анализировать параметры подключения до начала строительства
- Выявлять и устранять потенциальные проблемы качества электроэнергии

С управленческой точки зрения цифровой двойник трансформирует координацию между всеми участниками проекта. Единая база данных исключает разночтения, а автоматизация расчетов сокращает сроки согласований.

Для промышленных потребителей это означает ускорение выхода на проектную мощность, для сетевых компаний — повышение управляемости процесса. Цифровой двойник превращает технологическое присоединение из формальной процедуры в эффективный инструмент реализации промышленных проектов.

Литература

1. Тульский В.Н., Труханов П.А., Сергеев Е.А., Плеханов С.М., Овчаренко А.Н., Гущина Т.Н., Миронова С.И. Прогноз внедрения технологии «Цифровой двойник» в топливно-энергетическом и минерально-сырьевом комплексах // Вестник МЭИ. 2024.
2. Тягунов М.Г., Швердиев Р.П. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов // Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 109–118.
3. Павлов А. Цифровизация технологического присоединения: внешние и внутренние процессы // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2019. — №. 2(13). — С. 20–24.

А.А. Лебедева, студ.; Е. Сотниченко, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МАЛОГО И СРЕДНЕГО БИЗНЕСА В РФ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Кадровый потенциал малого и среднего бизнеса в России характеризуется существенным дефицитом квалифицированных кадров, что выступает ключевым барьером для экономического роста и реализации национальных задач. Текущее состояние осложняется недостаточным уровнем компетенций персонала, ограничивающим как индивидуальный карьерный рост, так и развитие кадрового потенциала предприятий в целом.

С точки зрения государственной поддержки в рамках национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика» акцент для МСП смещен в сторону качественных показателей, что открывает возможности для комплексных структурных изменений, способствующих всестороннему развитию персонала.

Вместе с тем наблюдаются позитивные тенденции роста доли затрат средних предприятий на обучение персонала в сфере инновационной деятельности (табл. 1) в общей структуре затрат, что указывает на осознание роли инвестиций в человеческий капитал.

Таблица 1. Динамика структуры затрат средних предприятий на инновационное обучение [1]

Год	2021	2022	2023
Максимум затрат, в % к прочим затратам	3,700	8,200	11,100
Затраты в среднем, в %	0,385	0,530	0,896

Инновации являются двигателем прогресса, они способны внести значительный вклад в развитие потенциала кадров. Именно поэтому в перспективе развитие кадрового потенциала МСП будет определяться в первую очередь внедрением инноваций, интеграцией цифровых технологий, системным обучением на всех стадиях работы с персоналом, а также гибкими формами занятости и государственной поддержкой. Данные факторы способны преодолеть существующие барьеры и перевести кадровый потенциал сектора на качественно новый уровень, обеспечив малый и средний бизнес в РФ перспективными, высококомпетентными кадрами.

Литература

1. Малое и среднее предпринимательство в России. 2024: Стат. сб. / Росстат. — М., 2024. — 97 с.

*Д.К. Шецьков, аспирант;
рук. Д.Ю. Савон, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

АДАПТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В условиях высокой динамики рынка электроники и растущей индивидуализации заказов традиционные методы планирования производства печатных плат (ПП) сталкиваются с ограничениями такими как длительные сроки переналадки оборудования, низкая гибкость при изменении приоритетов заказов, избыточные запасы комплектующих, неоптимальное использование производственных мощностей.

Адаптивное планирование с применением искусственного интеллекта (ИИ) позволяет оперативно реагировать на изменения, минимизируя издержки и повышая ритмичность выпуска [1].

Понятие Agile-модель (Гибкие методологии) понимает под собой совокупность подходов, ориентированных на гибкое и адаптивное управление разработкой.

При этом искусственный интеллект (ИИ; англ. Artificial intelligence, AI) — это наука и технология создания интеллектуальных машин, особенно интеллектуальных компьютерных программ [2].

Для решения задач применяются следующие решения машинное обучение, мультиагентные системы, цифровые двойники.

Ключевыми входными данными являются спецификации заказов (типы ПП, объёмы, дедлайны); статусы оборудования; запасы комплектующих на складе; исторические данные по длительности операций.

При этом практическая полезность данного подхода заключается в том, что включаются следующие элементы такие как модуль прогнозирования; оптимизатор графиков.

При внедрении данной технологии (за 6 месяцев) брак сократится на 5–10%, также значительно уменьшится себестоимость конечной продукции за счет автоматизации и сокращения количества бракованных изделий [3].

Литература

1. **Петров А.Н.** Теория планирования: первое приближение. — 2-е изд. — СПб: СПбГЭУ, 2023. — 151 с.
2. **Жигулина, Т.Н.** Информационные технологии в землеустройстве и кадастре : учебное пособие / Т.Н. Жигулина, Н.Ю. Боронина, П.А. Мягкий. — Барнаул : АГАУ, 2024. — 84 с.
3. **Как используют ИИ в российской промышленности:** реальный опыт, успешные кейсы // Заводы.РФ URL: <https://заводы.рф/publication/kak-ispolzuyut-ii-v-rossiyskoy-promyshlennosti-realnyy-opyt-uspeshnye-keysy> (дата обращения: 03.11.2025).

Х.Р. Парра, студ.; рук. С.А. Цырук, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТНО-ЭКСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ КУБЫ

Современный контекст кубинской экономики характеризуется растущим участием негосударственных форм управления (НФУ). Технологическая модернизация, диверсификация источников генерации и растущий спрос на специализированное оборудование и материалы делают операции по импорту и экспорту незаменимыми. Однако финансовые ограничения, правовые барьеры и высокая зависимость от государственных посредников затрудняют полное включение НФУ в эту сферу, что обуславливает необходимость глубокого анализа и разработки более гибких управленческих предложений.

Оценка действующей модели управления в ЭНЕРГОИМПОРТ, государственной внешнеторговой компании, показывает централизованную схему, в которой отсутствует специализированное подразделение для работы с НФУ, и данные операции обслуживаются одним специалистом. Процедура формально корректна, но предполагает прохождение через несколько уровней согласования, что замедляет заключение контрактов по сравнению со сроками, которых требуют частные заказчики. Работа осуществляется преимущественно в бумажном формате, без цифровизации и без установленных механизмов обратной связи с клиентами, что ограничивает операционную эффективность. В финансовом плане операции, как правило, осуществляются посредством банковских переводов из-за рубежа и авансовых платежей, что снижает риски неплатежей, но одновременно делает клиентов уязвимыми с контрактной точки зрения и повышает издержки. Несмотря на наличие у компании достаточно широкой базы поставщиков, операции с частными клиентами ведутся индивидуально, без рамочных контрактов и стабильных каталогов, что увеличивает неопределённость в отношении цен и сроков. Для НФУ ключевыми проблемами остаются длительные внутренние процедуры согласования, отсутствие товарных запасов по консигнационным договорам, а также нехватка финансовых инструментов и контрактной гибкости, адаптированных к их масштабу. Всё это подтверждает, что, хотя действующая модель обеспечивает государственный контроль и надзор, она недостаточна для удовлетворения требований эффективности и адаптивности, которые выдвигает рост негосударственного сектора.

Проведённая диагностика представляет собой прочную методологическую основу для разработки стратегии управления внешнеэкономическими операциями НФУ в компании ЭНЕРГОИМПОРТ.

С.Л. Деспайне, студ.; рук. С.А. Цырук, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ КОМПАНИИ «ЭНЕРГОИМПОРТ» КУБЫ

Современное состояние внешней торговли Кубы характеризуется высокой зависимостью национальной экономики от импорта топлива, промежуточной продукции и электроэнергетического оборудования, а также постепенным вовлечением различных хозяйствующих субъектов, предъявляющих спрос на технологические решения для энергетической системы. В этом контексте особое значение приобретают специализированные государственные компании по импорту и экспорту, такие как Энергоимпорт, обеспечивающие поставки оборудования и технологий для Национальной Электроэнергетической Системы (СЭН).

Несмотря на наличие формально регламентированных процедур, на практике процесс импорта характеризуется определённой фрагментацией информационных потоков и ограничениями в прослеживаемости операций между подразделениями и внешними участниками. Это приводит к менее оперативному и согласованному управлению, что подчёркивает целесообразность перехода к интегрированной, процессно-ориентированной цифровой информационной модели управления импортными операциями.

Цель исследования заключается в разработке модели совершенствования процесса импорта в компании «Энергоимпорт» на основе централизации и цифровизации управления информацией, которая позволит чётко описать ключевые этапы — от подачи Заявки на импорт до закрытия контракта.

Научная новизна работы состоит в системном применении процессного подхода и принципов цифровой трансформации к операциям по импорту в государственной компании электроэнергетического сектора с интеграцией в единую модель требований кубинской нормативной базы и лучших практик управления бизнес-процессами. Практическая значимость заключается в том, что предложенные меры могут быть использованы для более рациональной организации информационных потоков, сокращения сроков и числа ошибок при обработке документов, повышения согласованности взаимодействия коммерческих, финансовых, юридических и логистических подразделений и создания методологической основы для последующих интегрированных информационных систем управления импортом. Тем самым обеспечивается более эффективное использование ресурсов и повышение качества обслуживания конечного клиента.

В.А. Кочарян, студ.; Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ СИНДРОМА ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ВЫГОРАНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА ППС

В условиях роста психоэмоциональных нагрузок в высшем образовании проблема эмоционального выгорания профессорско-преподавательского состава приобретает особую актуальность. Синдром эмоционального выгорания негативно влияет на качество преподавания, научную продуктивность и общую эффективность работы преподавателей.

Основные проявления выгорания, снижающие производительность труда ППС:

- Снижение мотивации и профессиональной активности;
- Ухудшение качества взаимодействия со студентами и коллегами;
- Снижение эффективности педагогической и научной деятельности.

На примере ЮИПА был представлен анализ эмоционального выгорания преподавателей данного университета.

Таблица 1. Сравнительная таблица фаз эмоционального выгорания среди преподавателей ЮИПА

Фаза эмоционального выгорания	Преподаватели	Ключевые проявления
Напряжение	20%	Накопление отчаяния и негодования, недовольство собой и профессией
Резистенция	30%	Эмоциональная экономия, неадекватное реагирование чувствительность к критике
Истощение	20%	Ощущение эмоционального опустошения, неспособность сопереживать.

Таким образом, более 70% в разных фазах игнорирование проблемы выгорания приводит к прогрессирующему спаду производительности, проявляющемуся в формализме, эмоциональной отстраненности и потере профессиональных кадров. Для сохранения эффективности ВУЗа необходимы целенаправленные меры по поддержке сотрудников на всех стадиях выгорания.

Литература

1. **Аседач А.О.** Предотвращение профессионального выгорания сотрудников образовательных учреждений как фактор повышения производительности труда // Парадигма. 2019. № 2.

В.А. Кочарян, студ.; Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАБОТУ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА

В условиях цифровой трансформации образования и роста административной нагрузки на преподавателей высшей школы возникает необходимость в поиске новых инструментов для оптимизации труда. Внедрение технологий ИИ позволяет достичь значительного повышения производительности за счет автоматизации рутинных операций и предоставления аналитической поддержки.

Интеграция ИИ-решений в деятельность ППС может повысить эффективность работы за счет нескольких ключевых факторов:

- Автоматизация проверки учебных работ и тестирования;
- Сокращение времени на подготовку учебных материалов и отчетности;
- Повышение объективности оценки знаний;

На примере ведущего энергетического ВУЗа страны можно наблюдать за цифровизацией многих процессов, протекаемых в университете. Некоторые из них ниже будут рассмотрены.

Таблица 1. Перечень практик, предлагаемых для широкого тиражирования в НИУ «МЭИ»

Наименование группы практики	Почему предлагается для тиражирования	Примеры в ИС «кВт идей»
Автоматизированная генерация заданий для студентов	Осуществляется повышение квалификации преподавателя в IT области в процессе внедрения практики	Автоматизированная генерация билетов
Решения для автоматизированной проверки курсовых		Система автоидентификации результатов тестирования

Таким образом, цифровизация является стратегическим шагом к повышению производительности труда ППС. Это позволяет высвободить временные ресурсы для научно-исследовательской деятельности и индивидуальной работы со студентами, повысить качество образования и обеспечить устойчивое развитие вуза в конкурентной среде.

Литература

1. **Видова Т.А., Романова И.Н.** Возможности применения технологий ии в образовательном процессе / Образовательные ресурсы и технологии. 2023. № 1 (42).
2. Официальный сайт НИУ «МЭИ» [Электронный ресурс] URL: <https://mpei.ru>

А.Г. Бондарева, студ.;
рук. М.Н. Мызникова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ СФЕРЫ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ



Рис. 1. Аналитические данные из отчета ФНС России

Согласно теории, представляемой в работе Юкласовой А.В., на подразделения, организации, занимающиеся производством продукции (в случае с торговыми предприятиями, подразделения, занимающиеся снабжением продукцией и размещением ее производства на мощностях сторонних компаний-подрядчиков) оказывают значительное влияние «сегмент внешней среды, с которым осуществляется взаимодействие, представляют поставщики ресурсов и технической информации» [1, стр. 81].

Как видно на рисунке 1 с информацией от аналитической службы ФНС России, наблюдается факт

того, что в период с 2024 год по 2025 год наблюдается заметное снижение размеров уровня прибыли организаций на 8,3% в 2025 г. по отношению к предыдущему. Также наблюдается, что выручка компаний, то есть доходы, выросли на 18,9%, что говорит о том, что для компаний на российском рынке стало более дорого вести свой бизнес, что привело к снижению рентабельности и фондоотдачи от основной деятельности.

Причиной этого стало преимущественно воздействие внешних факторов на компании: нестабильная ценовая политика поставщиков, зависящая от условий мирового рынка, изменение курсов валют, колебание спроса потребителей, а также другие макро- и микроэкономические факторы.

Соответственно, для повышения эффективности работы компаниям сектора розничной торговли следует пересмотреть свои внутренние бизнес-процессы, перестроить их, а также обновить и/или модернизировать свои взаимоотношения с ключевыми поставщиками товаров.

Литература

1. Юкласова, А.В. Теория организации: учебное пособие. — Самара. Издательство Самарского университета, 2022 — 96 с.

Т.А. Алёшечкина, студ.;
рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ РФ

Анализ текущей ситуации показывает, что российская телекоммуникационная отрасль демонстрирует устойчивый рост, достигнув в 2024 году объема выручки 2,1 трлн рублей [1]. Однако структурный анализ отрасли выявляет фундаментальную трансформацию бизнес-моделей — переход от традиционных услуг связи к созданию цифровых экосистем.

Детальный анализ ключевых проблем позволяет выделить три основных вызова. Во-первых, технологическая зависимость от импортного оборудования создает риски для модернизации инфраструктуры. Во-вторых, дефицит радиочастотного спектра ограничивает развертывание сетей пятого поколения. В-третьих, кадровый дефицит усугубляется региональными диспропорциями на рынке труда. Анализ последствий санкционного давления позволяет систематизировать ключевые вызовы, с которыми столкнулась отрасль (таблица 1).

Таблица 1. Влияние санкций на телекоммуникационную отрасль

Сфера воздействия	Основные проблемы	Воздействие на отрасль
Технологическая	Ограничения поставок активного сетевого оборудования	Увеличение CAPEX, замедление модернизации инфраструктуры
Финансовая	Рост стоимости заемного финансирования	Снижение инвестиционной активности операторов
Кадровая	Разрыв международных образовательных программ, отток специалистов	Снижение качества подготовки кадров

Проведенный анализ позволяет констатировать, что российская телекоммуникационная отрасль демонстрирует способность к адаптации в условиях внешних вызовов, о чем свидетельствует устойчивый рост выручки и активное развитие цифровых экосистем. Достигнуты значительные успехи в области технологического импортозамещения, однако для закрепления положительной динамики требуется дальнейшее ускорение этого процесса.

Литература

1. Статья «Итоги года для российской телеком-отрасли» [Электронный ресурс]. URL: <https://digital.gov.ru/news/itogi-goda-dlya-rossijskoj-telekom-otrasli> (дата обращения: 16.11.2025).

Я.О. Антоненко, асп.;
рук. А.Г. Бадалова, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОГО И СРЕДНЕГО БИЗНЕСА

Перспективы отечественного бизнеса связаны с его сбалансированным развитием, оптимизацией ресурсного обеспечения, системностью финансовой и информационной поддержки со стороны государства и специализированных институтов. Инструментом системного развития выступают масштабные государственные программы и проекты. Принципы сбалансированности, непрерывности, модульности и адаптивности на сегодняшний день начинают внедряться в деятельность отечественных компаний, но пока еще носят имплицитный характер.

С 2025 года ключевым подходом к усилению экономического эффекта сектора МСП становится приоритет качественных, а не количественных метрик в оценке ресурсной обеспеченности малого и среднего предпринимательства. В связи с этим идет поиск новых механизмов и приемов оптимизации поддержки бизнеса. Одним из них является модульный принцип. Он хорошо зарекомендовал себя в качестве универсального аналитического и оценочного механизма в различных сферах, что вполне обоснованно позволяет его использовать в сфере малого и среднего бизнеса.

Опираясь на современный вектор развития предприятий МСП, стоит дополнить и актуализировать модульный механизм (в русле действующих государственных программ) в соответствии с качественными параметрами оценки. Актуализированная модель (на основе принципа цикличности) будет настроена на возможности перестройки сектора МСП в системе развития с учетом количественных и качественных характеристик. Оптимизированный модульный механизм позволит проводить комплексный анализ структурных изменений отечественного бизнеса, а также оперативно реагировать на возникающие проблемы в области обеспечения сектора МСП.

Литература

1. **Титов В.В., Сафронов А.С.** Проектно-ориентированное управление развитием малого и среднего бизнеса в рамках государственных программ // Проблемы теории и практики управления. — 2022. — № 5. — С. 84–95.

О.В. Белушенко, студ.;
рук. М.А. Знаменская, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ УНИВЕРСИТЕТА

Актуальность обусловлена противоречием между растущим объемом финансирования НИОКР в России и снижением позиций страны в Глобальном инновационном индексе (с 47-го места в 2022 году до 59-го в 2024 году) [2], что связано с неэффективным управлением инновационным потенциалом вузов, несмотря на активное сотрудничество с отраслевыми предприятиями и организациями.

Управление инновационным потенциалом вуза — это деятельность по оценке, развитию и реализации совокупности ресурсов (кадровых, научных, материально-технических, информационных и организационных) [1] для генерации и коммерциализации новых решений.

Для повышения эффективности управления инновационным потенциалом университета предлагается внедрить «Единое окно» — цифровой помощник университета, который представляет собой единую информационно-коммуникационную среду для подразделений (рисунок 1) для управления жизненным циклом инновационных разработок.



Рис. 1. Схема взаимодействия «Единого окна» с подразделениями университета

Внедрение «Единого окна» позволит существенно повысить ключевые показатели научного потенциала вуза, оптимизировать внутренние процессы и обеспечить эффективное цифровое управление научными знаниями, повышая таким образом конкурентоспособность университета и усиливая технологический суверенитет страны.

Литература

1. Хабибуллина Л.Р. Подход к оценке интеллектуального потенциала высших учебных заведений: экономические аспекты // Финансовые рынки и банки. — 2021. — № 9. — С. 11–15.
2. Глобальный инновационный индекс за 2022, 2023, 2024 год <https://www.wipo.int/documents/d/global-innovation-index/docs-en-wipo-pub-2000-2022-en-main-report-global-innovation-index-2022-15th-edition.pdf> (дата обращения 24.10.2025).

*Д. Кравченко, студ.;
рук. В.А. Епифанов, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МОНИТОРИНГ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПЕРСОНАЛА ТЭК

В современных предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) эффективность работы во многом зависит не только от технических знаний, но и от способности сотрудников управлять своими эмоциями и взаимодействовать с коллегами в стрессовых ситуациях. Эмоциональный интеллект (EI) становится критическим фактором безопасности.

Исследование «Эмоциональный интеллект как средство улучшения условий охраны труда и техники безопасности в нефтегазовом секторе» было направлено на то, чтобы понять, как эмоциональный интеллект работников влияет на связь между практиками охраны труда и техники безопасности и фактическими показателями безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли. Был проведен опрос 699 сотрудников трех крупных государственных нефтегазовых компаний. Результаты показывают, что сотрудники с более высоким эмоциональным интеллектом лучше справляются со стрессом, внимательнее относятся к рискам и ответственнее соблюдают правила безопасности. Такие работники чаще демонстрируют безопасное поведение, что улучшает общие показатели безопасности организации [1].

Исследование, которое проводилось в финском научном институте, где сотрудники работали в офисе с системами Emotion AI, в котором участвовали 11 сотрудников и исследователей. Они использовали датчики воздуха, движения, звука, камеры, сенсорные кресла, компьютерные трекеры и носимые устройства. Эти данные комбинировались с самоотчетами сотрудников. Результаты исследования показывают, что сотрудники в целом положительно воспринимают мониторинг самочувствия, но есть опасения насчет приватности: утечка данных, использование информации против работников, скрытый контроль или надзор, непонятные цели сбора данных. Emotion AI может улучшить благополучие сотрудников и эффективность организации, если соблюдены этические принципы, иначе технологии могут восприниматься как надзор, вызывая сопротивление [2].

Литература

1. **Кваме Эдмунд Н.Н., Суся Л., Эбенезер Л.З., Тетгум Качие А.Д.** Эмоциональный интеллект как средство улучшения условий охраны труда и техники безопасности в нефтегазовом секторе. Scientific Reports, 2023.
2. **Пииспанен Д.Р., Роуси Р.** Эмоциональный ИИ в рабочих средах: кейс-исследование // 15-я Международ. конф. (ICSOB 2024), университет Вааса.

Д.В. Полозов, асп.; рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РАЗРЕЗЕ РАЗВИТИЯ СТРАНЫ

Радиоэлектронная промышленность, является важнейшей составляющей развития страны, которая влияет на, безопасность, развитие высокотехнологичных отраслей, экономический рост, а также инновационный потенциал. Отставание данной отрасли ведет к застою страны, который сказывается на уровне жизни граждан.

Согласно графику на рисунке 1 сейчас отрасль наращивает объемы производства, необходимые для развития и независимости страны на мировой арене. А согласно стратегии развития электронной промышленности, к 2030 году показатели будут стремительно расти.

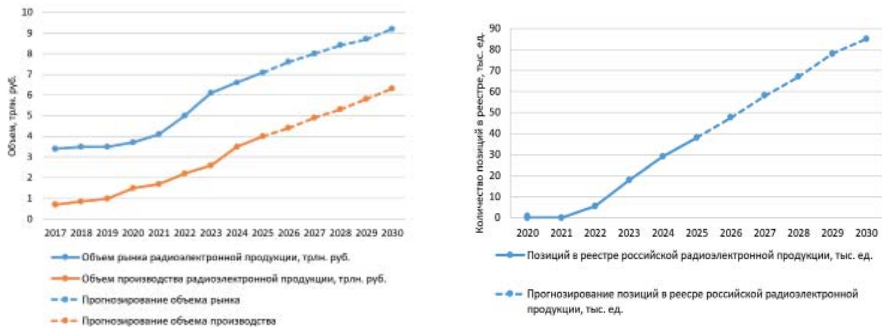


Рис. 1. Прогнозирование экономических показателей российской радиоэлектронной промышленности до 2030 г.

Анализируя прогнозные значения экономических показателей, можно отметить, что они взаимозависимы, а также напрямую отражают уровень развития отрасли в целом.

Объем рынка и продукции должны повышаться, так как он влияет на развитие страны, но также и не стоит забывать про численность радиоэлектронной продукции, ведь без роста количества отечественных изделий не будет роста рынков и развития. На показатели влияет множество факторов, которые будут рассмотрены далее.

Литература

1. Чередниченко Л.Г., Новикова Е.С., Голубцова Е.В. Финансовая политика государственной поддержки отрасли микроэлектроники в России в условиях санкций // Финансы: теория и практика. — 2023. — Т. 27. — №. 5. — С. 30–42.
2. Подгаецкий Н.А. К вопросу о механизмах развития радиоэлектронной промышленности в России // ЭКОНОМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ Учредители: ООО «Первое экономическое издательство». — 2024. — Т. 7. — №. 3. — С. 615–632.

А.С. Зимина, студ.; рук. М.Т. Заргарян, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

О ПРЕИМУЩЕСТВАХ ВНЕДРЕНИЯ БЕРЕЖЛИВОГО УПРАВЛЕНИЯ

В условиях нестабильной макроэкономической конъюнктуры управление затратами становится для организации ключевым фактором финансовой устойчивости. Рост себестоимости продукции при сохранении ценовой конкуренции ведёт к сокращению маржинальности, что вынуждает предприятия привлекать заёмный капитал, а в долгосрочной перспективе эта мера неэффективна. Сегодня Бережливое управление — это не просто набор инструментов для сокращения затрат, а целостная система непрерывного совершенствования, формирующая культуру постоянных улучшений [1]. Именно поэтому компании, успешно внедрившие эту философию, демонстрируют устойчивые результаты даже в сложных экономических условиях. Однако при внедрении данной концепции предприятие сталкивается с рядом проблем и сложностей, представленных на рисунке 1.

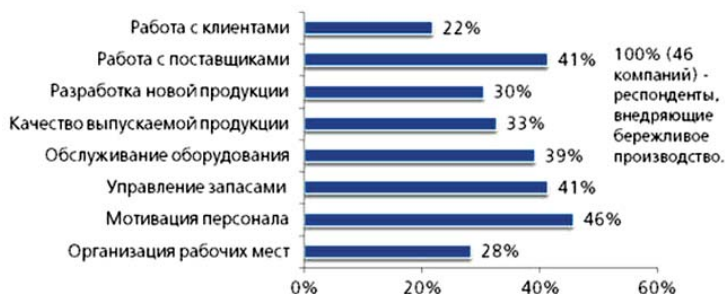


Рис. 1. Основные проблемы при внедрении Бережливого управления [2]

В 2025 году, когда конкуренция достигла невиданной остроты, а ресурсоэффективность становится критическим фактором выживания бизнеса, принципы бережливого управления актуальны как никогда раньше. В заключение можно утверждать, что бережливое управление позволяет отечественным компаниям добиваться конкурентного преимущества при ограниченных инвестиционных возможностях. Вместо капиталоемких проектов по модернизации оборудования, многие организации достигают сопоставимого роста производительности за счет оптимизации существующих процессов и вовлечения персонала.

Литература

1. Азаркевич, И.В. Внедрение бережливого производства: шаг за шагом / И.В. Азаркевич // Стандартизация. — 2025. — № 1. — С. 46–49.
2. Основы бережливого управления [Электронный ресурс]: информационно-методические материалы. — Краснодар, 2023. — 64 с. — Режим доступа: локальная сеть КубГУ. — Загл. с экрана.

Д.В. Полозов, асп.;
рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОЙ (РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ) ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Понимание структуры радиоэлектронной промышленности является важным аспектом для прогнозирования отрасли, так как в данную отрасль входит множество уникальных областей.

Электронная промышленность — отрасль экономики, связанная с разработкой и производством электронного оборудования, модулей, компонентов и встраиваемого программного обеспечения.

На рисунке 1 представлена структура промышленности, которая охватывает компонентную базу, как основу всех устройств, а также производство средств и разработку ПО.



Рис. 1. Структура Электронной (радиоэлектронной) промышленности

Четкое разделение и понимание нюансов каждой отрасли в промышленности поможет лучше продумать и разработать механизм прогнозирования бизнес-процессов на предприятиях радиоэлектронной промышленности.

Литература

1. Стратегия «Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» от 17.01.2020 № 20-п // [Электронный ресурс] URL: <http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf> (дата обращения: 20.11.2025).

А.Р. Сударева, студ.; рук. Е.Б. Гончарова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДАЖАМИ С ПОМОЩЬЮ CRM-ДАШБОРДОВ

В условиях цифровой трансформации экономики эффективность управления продажами напрямую зависит от скорости принятия решений на основе актуальных данных. CRM-дашборды позволяют видеть ключевые метрики в режиме реального времени, своевременно замечать изменения в динамике продаж и точнее распределять ресурсы.

Дашборд позволяет проводить самые глубинные исследования для поиска гипотез и совершенствования CRM-маркетинга, он учитывает особенности бизнес-процессов компании, структуру воронки продаж и индивидуальные KPI менеджеров [1].

Дашборд обладает рядом ключевых преимуществ. Во-первых, это наглядная демонстрация данных через понятные графики, схемы и диаграммы, упрощающие восприятие сложной информации. Во-вторых, интерактивность позволяет пользователям применять фильтры для анализа различных срезов данных и детализации информации. В-третьих, мобильный доступ обеспечивает возможность просмотра дашбордов не только с компьютера, но и через смартфон. Наконец, гибкая настройка метрик позволяет полностью адаптировать дашборд под индивидуальные потребности пользователя [2].

Внедрение дашбордов способствует значительному снижению времени на подготовку отчётности, повышению качества планирования, улучшению дисциплины менеджеров и более точному прогнозированию продаж [1].

Один из примеров увеличения продаж благодаря CRM-дашбордам — кейс магазина «СуперМерч», благодаря чему обороты магазина выросли на 40% [3].

Таким образом, внедрение CRM-дашбордов трансформирует подход к управлению продажами, обеспечивая переход от реактивного контроля к проактивному стратегическому управлению на основе данных.

Литература

1. Исследование эффективности использования дашбордов в crm-маркетинге // CYBERLENINKA URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-effektivnosti-ispolzovaniya-dashbordov-v-crm-marketinge> (дата обращения: 27.11.2025).
2. Дашборды онлайн // МЕГАПЛАН URL: <https://megaplan.ru/crm-capabilities/dashboard/> (дата обращения: 27.11.2025).
3. Кейс об увеличении продаж на 40% // Институт бизнес аналитики URL: <https://alexkolokolov.com/ru/blog/kejs-o-rabote-crm-i-bi-v-biznese> (дата обращения: 27.11.2025).

Л. Фуэнтес Марреро, асп.;
рук. О.А. Бучнев, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИНТЕГРАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КАК ОСНОВА УСТОЙЧИВОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

В настоящее время признано, что устойчивое конкурентное преимущество больше не является результатом изолированной интерпретации операционной эффективности, а формируется из системной согласованности взаимодействия стратегии, процессов, персонала, технологий и управления [1]. Бизнес-процессы в их современной концепции, согласно ISO 9000:2015, определяются как наименьшая единица ценности, ориентированная на удовлетворение клиента [2]. Технической оптимизации процессов (иерархических функций, потоков, ориентированных на результат) недостаточно, если не учитывается организационная приемлемость, то есть степень их понимания, принятия и поддержки сотрудниками, менеджерами и заинтересованными сторонами.

Классические симптомы неэффективности, такие как дублирование функций, узкие места и медлительность в работе, представляют собой не отдельные ошибки, а проявления системной дезинтеграции в пяти взаимозависимых измерениях: структурном, управленческом, культурном, конкурентном и коммуникационном. Из этого опыта вытекают три универсальных принципа, применимых к организациям: интеграция предшествует оптимизации [3], конкурентное преимущество является результатом последовательности, а не изолированной эффективности, организационная приемлемость — необходимое условие устойчивости.

Любое улучшение должно начинаться с диагностики, а не с констатации проблемы; поэтому трансформация требует логики интеграции как стратегии системной координации, необходимое условие для достижения подлинной оптимизации организации.

Литература

1. Эрнандес Р.А. Элементы системной конкурентоспособности малых и средних предприятий (МСП) в Центральноамериканском перешейке / под ред. ООН. Мехико: ООН, ЭКЛАК, Отдел промышленного развития, 2001. — С. 1–59.
2. Фуэнтес Марреро Л. Методы и инструменты интеграции бизнес-процессов // XXXVII Промежуточная научно-практическая конференция «21-я неделя: фундаментальная наука и технологии». Бангалор, Карнатака, Индия : Научно-издательский центр «Академический, 2025. — С. 173–183.
3. Кусаинова М.К. Интегрированная системная модель Бизнес-процессов как инструмент эффективности деятельности предприятия в условиях цифровой экономики // ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ. 2024. — С. 106–110.

И.О. Продан, студ.; Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ
В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

В условиях ускорения технологического прогресса и ужесточения экологических требований строительная отрасль претерпевает значительные изменения. Современные тенденции направлены на повышение эффективности, безопасности и устойчивости объектов за счет внедрения цифровых технологий, новых материалов и методов организации работ. Ключевые направления трансформации включают:

- Цифровизация и внедрение BIM (информационное моделирование зданий), позволяющая координировать все этапы жизненного цикла объекта — от проектирования до эксплуатации;
- Использование робототехники и беспилотных технологий для автоматизации трудоемких и опасных процессов, таких как кладка, сварка или мониторинг стройплощадок;
- Развитие зеленого строительства и внедрение энергоэффективных материалов, направленное на снижение экологического следа и операционных расходов зданий;

На примере ведущих строительных компаний и национальных проектов видно, как данные инновации меняют ключевые показатели.

Таблица 1. Сравнительные показатели эффективности при использовании традиционных и современных технологий

Показатель	Традиционные методы	С применением современных технологий
Сроки проектирования и согласования	4–6 месяцев	1–2 месяца (с использованием BIM)
Уровень отходов на стройплощадке	10–15%	3–5% (при точном заводском производстве)
Затраты на эксплуатацию в первый год	100% (базовый уровень)	Снижение на 20–30%

Таким образом, переход на современные технологии в строительстве является стратегической необходимостью для повышения конкурентоспособности, снижения себестоимости и сроков строительства, а также для соответствия мировым стандартам качества и устойчивого развития. Это позволяет не только оптимизировать издержки, но и создавать более комфортную и безопасную среду для жизни и работы.

Литература

1. **Иванов А.С., Петрова Е.Л.** Цифровая трансформация строительной отрасли: BIM и IoT // Строительные технологии. 2023. № 4 (58).

Е.Н. Петрова, студ.; М.А. Знаменская, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АДАПТАЦИЯ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ В МЕЖКУЛЬТУРНОЙ СРЕДЕ ВУЗА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Цифровизация образования существенно изменила условия обучения иностранных студентов, повлияв на их социальную, академическую и культурную адаптацию. Рост онлайн-коммуникации, внедрение цифровых платформ и удалённых технологий обучения создают новые возможности для взаимодействия, но одновременно усиливают языковые барьеры и снижают интенсивность живых контактов [1].

В условиях увеличения числа иностранных студентов (2023 год — 336 000 чел., 2024 год — 376000 чел.) в российских вузах особое значение приобретает способность университетов обеспечивать комфортную интеграцию в цифровой образовательной среде. Цифровые сервисы — электронные платформы, онлайн-кабинеты, системы расписания и коммуникации — становятся важной частью академической поддержки. Однако их эффективность зависит от доступности, удобства и уровня цифровой компетентности самих студентов.

Основные трудности адаптации иностранных студентов в цифровой среде:



Рис. 1. Основные трудности адаптации

Несмотря на существующие барьеры, цифровизация расширяет образовательные возможности иностранных студентов: обеспечивает доступ к учебным материалам и формирует навыки, востребованные в современном профессиональном пространстве.

Таким образом, цифровая трансформация образовательной среды оказывает двойственное влияние на адаптацию иностранных студентов. Для эффективной интеграции требуется сочетание онлайн- и офлайн-взаимодействий, развитие цифровой инфраструктуры, а также поддержка университетом не только академических, но и социокультурных потребностей обучающихся.

Литература

1. Пашков М.В., Пашкова В.М. Проблемы и риски цифровизации высшего образования // Высшее образование в России. — 2022. — Т. 31. № 3. — С. 40–57.

*Е.И. Донишева, студ.;
рук. А.Г. Бадалова, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ESG-РЕЙТИНГА КОРПОРАЦИЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА

В настоящее время рынок природного газа характеризуется усилением конкуренции среди мировых производителей топлива, в связи с этим предприятия топливно-энергетического сектора стремятся повышать свой ESG-рейтинг и показатели экологической ответственности, внедряя устойчивые практики и реализуя экологические инициативы. ESG-трансформация — это фундаментальное изменение бизнес-модели компании, направленное на интеграцию экологических, социальных и управленческих принципов в основную стратегию деятельности [1].

В рамках проведенного исследования осуществлен комплексный анализ влияния ESG-факторов на репутацию и привлекательность компании «Газпром» в качестве лидера отрасли российского ТЭК. Исходя из данных отчета за 2024 год об устойчивом развитии, ПАО «Газпром» активно развивает экологические программы, социальные инициативы и цифровизацию процессов, снижая воздействие на природу и повышая качество жизни сотрудников и населения регионов присутствия [2].

Исходя из полученных результатов анализа, были разработаны теоретико-методические рекомендации в области управления эко-проектами по: усовершенствованию методологии учёта выбросов парниковых газов, интеграции принципов устойчивого развития в корпоративную стратегию, созданию системы мониторинга экологических показателей и реализации экологических проектов, а также по цифровому преобразованию ключевых бизнес-процессов.

Реализация предложенных разработок позволит повысить уровень экологической ответственности российских корпораций (включая ПАО «Газпром») и укрепить их позиции в мировом ESG-рейтинге. По прогнозным оценкам, прирост рейтинга возможен на 15–20%. Помимо этого, ожидаемым результатом станет значительное снижение операционных расходов за счет повышения энергетической эффективности производственных процессов и сокращение штрафных санкций за нарушение экологических норм.

Литература

1. **Щербаченко П.С.** ESG-трансформация бизнеса и региона / П.С. Щербаченко // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 56. — [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/53FAVN624.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).
2. **Отчет Группы Газпром** о социальной деятельности в области устойчивого развития за 2024 год — [Электронный ресурс]. URL: [/Users/user/Downloads/gazprom-sustainability-report-2024-ru.pdf](#) (дата обращения: 03.12.2025).

Н.Е. Прошкин, асп.; рук. О.А. Бучнев, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УНИВЕРСИТЕТ КАК ДРАЙВЕР ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

В формировании экономики, основанной на знаниях, университет эволюционирует от классического института трансляции знаний, умений и навыков (ЗУН) в рамках «знаниевой» парадигмы в ключевой субъект региональной инновационной экосистемы. Эта трансформация, ускоренная цифровизацией и переходом к компетентностной модели, определяет вклад вуза не только в подготовку кадров, но и в генерацию технологий, предпринимательской активности и рост человеческого капитала территории.

В настоящее время в качестве основных механизмов реализации этой роли выступают: 1) формирование компетенций для цифровой экономики, преодолевающее инерцию долгосрочных образовательных циклов; 2) проведение прикладных научных исследований, интегрированных в образовательный процесс по модели «университет 3.0»; 3) создание инновационной инфраструктуры (технопарки, инкубаторы, стартап-студии) для коммерциализации разработок.

Данные направления взаимосвязаны и образуют синергетический эффект. Так, фундаментальные исследования обеспечивают базу для технологических стартапов, образовательные программы поставляют в них человеческий капитал, а инновационная инфраструктура снижает транзакционные издержки вывода продукта на рынок.

Необходимо отметить, что эффективность университета как драйвера напрямую зависит от его способности преодолеть исторически сложившиеся барьеры: формализацию образовательного процесса, разрыв между скоростью обновления компетенций и длительностью образовательного цикла, а также «цифровое неравенство» в оснащении между вузами.

Таким образом, современный университет является не просто поставщиком кадров, а системообразующим элементом экономики региона [1]. Его переход к роли центра экосистемы позволяет диверсифицировать региональную экономику, создавать новые высокотехнологичные рабочие места и удерживать таланты. Однако реализация этого потенциала требует от государства и региональных властей целенаправленной политики по снижению инвестиционных барьеров и созданию сетевых связей между университетами, бизнесом и властью.

Литература

1. Бучнев А.О., Осипов А.В. Региональное экономическое развитие в условиях цифровой глобализации // Вестник РАЕН. — 2025. — Т. 25, № 2. — С. 99–106. — DOI 10.52531/1682-1696-2025-25-2-99-106. — EDN QBYOXH.

Т.М. Магомедов, асп.;
рук. Е.Б. Гончарова, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА В ЭНЕРГЕТИКЕ

В настоящее время существует проблема технологического отставания ведущих промышленных предприятий в области электроэнергетики Российской Федерации от предприятий развитых зарубежных стран. Инновационный потенциал предприятий с 2022 года столкнулся с глобальным экономическим вызовом, включающим в себя геополитическую напряженность и введением более 35 тысяч санкций против России.

Согласно данным Министерства экономического развития Российской Федерации, существует необходимость модернизации производств, разработки инновационной и конкурентноспособной на мировом рынке продукции, увеличения не сырьевого неэнергетического экспорта [1].

Российская Федерация имеет самую высокую обеспеченность минеральными ресурсами и достаточный потенциал для внедрения инновационных программ. В рамках проведенного исследования увеличить производственный потенциал можно следующим путем:

1. Применением механизмов государственно-частного партнерства;
2. Цифровизацией экономики;
3. Обучением основного состава работников предприятия;
4. Выбором стратегии управления рисками;
5. Бенчмаркингом лучших практик;
6. Развитием конкуренции генерирующих предприятий в естественных монополиях, конкурентной борьбы генерирующих предприятий за доступ к электросетям;
7. Развитием конкуренций в потребляющем секторе экономики;
8. Развитием электроэнергетики на основе метода стратификации;
9. Развитием процесса самоорганизации на предприятиях.

Собранная информация позволила сделать вывод об необходимости разработки комплексной программы развития инновационного потенциала, которая с помощью цифровых решений позволит показать оценку экономической эффективности инновационных проектов в области энергетики.

Литература

1. Официальный сайт Министерства экономического развития. URL: economy.gov.ru (дата обращения: 10.12.2025).

И.О. Богданова, студ.;
рук. М.В. Бузулуцкая, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ (НА ПРИМЕРЕ АО «ТРАНСНЕФТЬ — ВЕРХНЯЯ ВОЛГА»)

В условиях усиления конкуренции и роста требований к надёжности логистических операций в сфере магистрального трубопроводного транспорта особую актуальность приобретает оптимизация логистической деятельности. Для таких системообразующих компаний, как АО «Транснефть — Верхняя Волга», эффективное управление материальными и информационными потоками становится критическим фактором снижения издержек и повышения устойчивости операционного цикла.

Анализ логистической деятельности предприятия выявил ключевые проблемы в области управленческого учёта и координации процессов, связанные с неэффективностью логистической информационной системы и отсутствием полноценной модели управления затратами. Наибольшие риски сосредоточены в блоках логистического менеджмента и транспортно-экспедиционной деятельности.

В качестве основного мероприятия по оптимизации предложено внедрение интегрированной информационной системы BPOnline CRM и сопутствующей модели управления логистическими затратами. Это позволит автоматизировать ключевые бизнес-процессы, стандартизировать данные и повысить прозрачность управления.

Расчёт экономической эффективности подтверждает высокую результативность проекта: снижение трудоёмкости управленческих операций на 5%, условное высвобождение численности и годовая экономия в размере 13,1 млн рублей. Срок окупаемости проекта составляет около 7 дней.

Комплексный подход к оптимизации, включающий технологические и организационные улучшения, создаёт устойчивую основу для повышения эффективности логистической системы предприятия, сокращения операционных издержек и укрепления его конкурентных позиций.

Литература

1. **Аникин, Б.А.** Логистика и управление цепями поставок: учебник / Б.А. Аникин, Т.А. Родкина. — Москва: Проспект, 2023. — 448 с.
2. Официальный сайт АО «Транснефть — Верхняя Волга». — Текст: электронный. — URL: <https://uppervolga.transneft.ru> (дата обращения: 20.05.2025).

Е.А. Красова, студ.; рук. Е.С. Орлова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВНУТРЕННИЙ АУДИТ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ: НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В условиях возрастающей неопределённости бизнес-среды внутренний аудит эволюционирует из инструмента формального контроля в стратегический механизм управления рисками. Если раньше его основная задача сводилась к выявлению уже совершённых нарушений, то сегодня приоритет смещён на активное обнаружение потенциальных угроз и минимизацию будущих потерь.

В современной бизнес-среде внутренний аудит трансформируется из инструмента после проверки в активный механизм управления рисками. Ключевым методологическим основанием этой эволюции выступает риск-ориентированный подход, при котором ресурсы концентрируются на наиболее уязвимых зонах: аудитор анализирует взаимосвязи рисков и процессов, формирует рейтинг рискованности и на этой базе выстраивает план проверок. Такой принцип соответствует международным стандартам риск-менеджмента, где подчёркивается необходимость интеграции аудита в общую систему управления рисками организации [1, 2].

Совершенствование аудита через непрерывный мониторинг, цифровизацию и интеграцию с стратегическим управлением демонстрирует высокую экономическую эффективность: при совокупных затратах 1 180 000 руб. проект окупается за 13–14 месяцев, что оптимально для организационных преобразований; при ставке дисконтирования 20% проект показывает значительный запас прочности — NPV составляет 439 444 руб., а коэффициент эффективности равен 1,37 (каждый вложенный рубль приносит 1,37 руб. дисконтированного дохода за 2 года), обеспечивая устойчивость к колебаниям затрат, резерв для непредвиденных расходов и потенциал масштабирования; при этом компании дополнительно получают снижение потерь от нарушений на 25–40%, экономию времени на проверках на 20–30% и двух-трёхкратное ускорение реакции на риски, а возврат инвестиций в цифровизацию достигает 1,8–2,5 руб. на рубль вложений за два года [2].

Литература

1. **ISO 31000:2018** «международный стандарт «Менеджмент риска. Принципы и руководство» « от 10.12.2019 № 1379 2010.
2. **Крышкин О.В.** Настольная книга по внутреннему аудиту. — Москва: Омега-Л, 2023. — 478 с.

Д.Н. Чумак, асп., рук. О.А. Бучнев, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРОЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИТЕРИЕВ, ОТРАЖАЮЩИХ КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОЕКТОВ ГЧП НА РАЗВИТИЕ ОТРАСЛИ

Энергетика играет ключевую роль в развитии различных отраслей промышленности и обеспечении устойчивого развития экономики.

В условиях ограниченности бюджетов различного уровня, необходимости привлечения частных средств и управленческих ресурсов в развитие промышленных объектов актуальным становится вопрос применения механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП).

Учитывая особый характер реализации проектов ГЧП, в которых участвуют как публичный партнер (государство), так и частный (бизнес-структуры) важным аспектом является оценка целесообразности реализации таких проектов и их эффективности. Основными критериями, которыми руководствуются при оценке эффективности проектов ГЧП являются: финансовая и социально-экономическая эффективность.

В большинстве случаев критерии финансовой эффективности применимы к оценке ГЧП проекта с учетом достижения целей частного партнера, однако достижение целей, поставленных публичным партнером, требует принципиально иного подхода, а именно его оценки с точки зрения социально-экономического эффекта проекта ГЧП.

Предлагаемые к реализации проекты государственно частного партнерства в энергетике часто имеют значительный потенциал, однако эффективность таких инициатив зачастую оценивается только с точки зрения финансовой эффективности, которая не всегда может достаточно точно определена особенно на этапе инициации проекта, при этом такой проект может быть направлен на решение острых проблем, имеющих в отрасли. В научной литературе нет единого мнения по вопросу оценки социально-экономического эффекта проектов ГЧП. Это может быть связано как с уникальностью результата проекта ГЧП, так и спецификой отрасли, в которой он реализуется, при этом многие ученые сходятся во мнении относительно необходимости оценки социально-экономического эффекта проектов государственно-частно партнерства на основе документов стратегического планирования и национальных (региональных) программ.

Предлагаемый подход позволяет оценивать социально-экономический эффект проекта ГЧП системно с учетом критериев, характеризующих влияние проектов ГЧП на развитие отрасли.

*П.А. Матюшина, студ.;
рук. В.С. Панчева, к.э.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОМПАНИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ РЫНОЧНОЙ ВОЛАТИЛЬНОСТИ

В условиях экономической нестабильности эффективное управление денежными средствами критически важно для строительных компаний, чья деятельность капиталоемка и имеет длительный производственный цикл. Формирование защищенного и доходного инвестиционного портфеля является для них стратегической задачей по сохранению капитала, обеспечению ликвидности и диверсификации доходов.

Работа сфокусирована на решении прикладных задач: от выбора между портфелями с разными целевыми функциями до разработки механизма активного управления в кризисных условиях. Её новизна заключается в адаптации классических методов портфельного анализа (теории Марковица и коэффициента Шарпа) к реалиям российского фондового рынка и специфике строительного бизнеса, а также в разработке ребалансировочной стратегии на основе сценарного анализа [1].

На основе проведенных расчетов были сформированы и оценены две альтернативные стратегии.

Портфель минимального риска, где ожидаемая доходность — 5,2% годовых, а риск (СКО) — 6,8% и портфель максимальной доходности, где ожидаемая доходность — 6,6% годовых, а риск (СКО) — 8,3%.

В качестве оптимального был выбран портфель максимальной доходности, который демонстрирует лучшее соотношение доходности и риска (коэффициент Шарпа 0,65 против 0,59). Его реализация предполагает увеличение долей в высокодоходных акциях (ЛСР, Диасофт, ГК «Астра», ПИК) при сохранении надежной доли облигаций.

Внедрение предложенной стратегии и механизмов управления позволит компании не только защитить свои финансовые ресурсы от инфляции, но и получить дополнительный инвестиционный доход. В количественном выражении в долгосрочной перспективе (2026–2028 гг.) ожидается рост доходности портфеля до 5–7% годовых, что при диверсификации позволит увеличить собственный капитал компании на 10–15% и улучшить коэффициент ликвидности до 4,0 (с текущих 2,33).

Литература

1. **Марковиц Г.** Выбор портфеля: эффективная диверсификация инвестиций / Г. Марковиц. — М.: Альпина Паблишер, 2022. — 352 с.
2. Официальный сайт Московской Биржи. — URL: <https://www.moex.com/> (дата обращения: 16.10.2025).

Ю.И. Иванова, студ.; рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТРАНСФОРМАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В БИОТЕХНОЛОГИИ

Актуальность исследования обусловлена стратегическим приоритетом развития биотехнологий в Российской Федерации в рамках национального проекта «Биоэкономика» (2025–2030 гг.), в условиях которого вузы сталкиваются с вызовами цифровой трансформации, разрозненностью образовательных программ и недостаточной интеграцией с реальным сектором экономики. Целью работы является разработка комплексного подхода к управлению качеством подготовки специалистов в области биотехнологии, отвечающего требованиям национальных стратегий и международных стандартов образования.

Предлагаемая модель основана на системной интеграции управленческого цикла PDCA (Plan–Do–Check–Act), принципов всеобщего управления качеством (TQM) и требований стандарта ISO 21001:2018, дополненных цифровыми образовательными технологиями: системами управления обучением (LMS), learning analytics и искусственным интеллектом. Новизна подхода заключается в разработке интегративной модели управления качеством образования в области биотехнологии.

Автором сформулированы ключевые компоненты модели, предложены механизмы её реализации с использованием LMS, learning analytics и ИИ, а также обоснованы критерии оценки эффективности образовательного процесса с учётом потребностей биотехнологической отрасли и требований национального проекта «Биоэкономика».

Ожидаемый результат — повышение эффективности подготовки кадров для биотехнологического сектора за счёт выстроенной системы управления качеством, объединяющей управленческие стандарты и цифровые инструменты, что способствует достижению целей национального проекта «Биоэкономика».

Литература

1. **Дворяцких И.А., Герасимова Н.А.** Lean Six Sigma и PDCA (plan-do-check-act) в системе образования [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». — 2024. — № 1 (январь).
2. **Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309** «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации.
3. **Roy, D., Sunil, K., & Baskey, S.K.** (2021). Total quality management in educational institutions. An International Bilingual Peer Reviewed Refereed Research Journal, 11(41),258–263.

*А.Е. Бершанская, студ.;
рук. Н.Л. Кетоева, к.э.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ФОРМИРОВАНИЕ ГРУППЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

В современном мире с быстро меняющейся экономической ситуацией оценивать эффективность бизнес-процесса управления финансовой деятельностью предприятия, опираясь только на классические финансовые показатели недостаточно, поэтому актуальность данной статьи заключается в детализации и адаптации классической методологии для оценки внутреннего бизнес-процесса, а именно бизнес-процесса управления финансовой деятельностью предприятия применив систему Balanced Scorecard (далее-BSC) для оценки эффективности бизнес-процесса управления финансовой деятельностью предприятия [1].

За основу были взяты четыре основные перспективы BSC (“Финансы”, “Клиенты”, “Внутренние бизнес-процессы”, “Обучение и развитие”) и переосмыслены применительно к финансовой службе [2].

На основе четырех преобразованных перспектив сформирована стратегическая карта финансового бизнес-процесса. Данная карта является не просто дополнением к перспективам BSC, а его структурным стержнем и главным элементом новизны.

Практическая значимость BSC описанной выше заключается в том, что такая система переводит финансовую службу из роли «учетного органа» в статус стратегического партнера, чья деятельность напрямую влияет на стоимость и устойчивость всего бизнеса.

Предложенная модель, основанная на адаптации и модификации методологии Сбалансированной системы показателей (BSC), позволяет преодолеть ограниченность традиционных, зачастую фрагментарных, систем измерения [3].

Литература

1. **Иванов А.А.** Управление эффективностью бизнеса: концепции, методы, case-studies : монография / А.А. Иванов, Е.В. Петрова. — Москва : КноРус, 2021. — 256 с. — ISBN 978-5-406-08765-4.
2. **Ковалев В.В.** Финансовый менеджмент: теория и практика : учебник / В.В. Ковалев. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Проспект, 2022. — 1104 с. — ISBN 978-5-392-34589-1.
3. **Damodaran A.** Corporate Finance: Theory and Practice / A. Damodaran. — 4th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2023. — 912 p. — ISBN 978-1-119-87319-5.

Направление VII
ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОНОМИКА
ПРЕДПРИЯТИЙ
Energy and economy of enterprises

Руководитель направления:

Директор института
энергоэффективности и водородных
технологий НИУ «МЭИ»

к.т.н., доцент

Щербатов Иван Анатольевич

Секция 33
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
Industrial electric power engineering

Председатель секции: к.т.н., доцент Цырук Сергей Александрович

Секретарь секции: к.т.н., доцент Матюнина Юлия Валерьевна

В.В. Журов, студ.; рук. Г.Р. Титова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ОБДУВА

Температура является самым значимым внешним фактором, влияющим на работу, срок службы и перегрузочную способность трансформаторов. Перегрев ведет к ускоренному старению изоляции. Превышение номинальной рабочей температуры изоляции всего на 6–8 °С сокращает ее срок службы вдвое.

Целью данной работы является изучение влияния тангенциальных вентиляторов обдува на температуру обмоток сухих трансформаторов, их прогнозируемый срок службы и перегрузочную способность.

В качестве объекта исследования было выбрано отдельно стоящее сооружение комплектной трансформаторной подстанции, в котором располагаются четыре сухих трансформатора с литой изоляцией, которые питают центр обработки данных (дата-центр).

Для измерения температуры обмоток трансформатора использовались промышленные термореле MT200L DIEL, которые были подключены к тепловым датчикам PT 100.

В результате исследования были получены данные по температуре обмоток трансформаторов, которые обдувались тангенциальными вентиляторами, и данные по температуре обмоток, где вентиляторы не применялись. После получения данных по разнице температур помещения КТП и обмоток трансформаторов были построены графики разницы температур в этих случаях. Согласно полученным результатам, разница температур обмоток при обдуве вентиляторами и без обдува составляет не менее 7 °С. Таким образом, применение тангенциальных вентиляторов позволяет продлить срок службы сухих трансформаторов вдвое и повысить их перегрузочную способность на 10–15%.

Литература

1. **Петров, А.Н.** Химическая термодинамика / А.Н. Петров. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006.
2. **ГОСТ Р 54419-2011.** Трансформаторы силовые. Руководство по нагрузке сухого трансформатора. С. 3–10.
3. **Кудрин, Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. — 2-е изд. — М.: Интернет Инжиниринг, 2006.

*А.В. Востоков, И.Р. Мишин, студ.;
рук. Д.В. Михеев, к.т.н., к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАШИН

Высоковольтные асинхронные электродвигатели наиболее часто применяются в промышленном производстве, горнодобывающей промышленности и нефтегазовой отрасли, являются ключевыми элементами производственных систем. Данные машины требуют надежного электроснабжения и комплексной защиты от различных аварийных режимов, способных привести к выходу оборудования из строя и нарушению технологического процесса. Основные типы возможных отказов включают обрыв фазы, межвитковое замыкание, междуфазное замыкание, отклонение напряжения питающей сети и затянутый пуск двигателя [1]. Каждый из этих режимов представляет угрозу для целостности оборудования и безопасности производственного процесса. Эффективная защита высоковольтных двигателей от этих аварий осуществляется посредством применения терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА), позволяющих оперативно обнаруживать и ликвидировать аварийные режимы, обеспечивая автоматическое отключение поврежденного оборудования [2].

Предложен проект лабораторного стенда, предназначенного для моделирования различных типов аварий высоковольтных асинхронных электродвигателей и организации практической подготовки специалистов в области релейной защиты промышленных объектов. Стенд обеспечивает воспроизведение контролируемых аварийных режимов в безопасных условиях, позволяет обучать персонал принципам работы защитных устройств, формировать навыки расчёта и настройки уставок, а также практические умения в эксплуатации терминалов релейной защиты.

Литература

1. **Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 248 с.
2. **Беседин Е.А., Рейзов А.С., Барчо Р.А., Джикаев В.Д.** Современные виды защит для релейной защиты высоковольтных электродвигателей и их моделирование // Наука. Техника. Технологии (Политехнический Вестник) — 2021. — № 1. — С. 39–47.

*И.Р. Мишин, А.В. Востоков, студ.;
рук. Д.В. Михеев, к.т.н., к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ В СРЕДЕ SIMINTECH

Развитие подходов к цифровому моделированию подстанций и их взаимодействию с устройствами автоматизации способствует повышению надёжности на объектах энергосистемы и является одним из главных направлений развития современной электроэнергетики. Разработка и тестирование систем релейной защиты и автоматики требуют проведения комплексных испытаний устройств защиты в условиях, максимально приближённых к реальным аварийным режимам энергосистемы. Применение программно-аппаратного моделирования позволяет существенно снизить трудозатраты на разработку и наладку алгоритмов РЗА и ускорить процесс их верификации. Интеграция моделей с реальными терминалами РЗА, оснащёнными современными коммуникационными интерфейсами, остаётся актуальной задачей, требующей разработки методик обмена данными между цифровыми моделями подстанции и микропроцессорными устройствами [1].

В рамках проведённой работы разработаны детализированные математические модели первичного и вторичного оборудования подстанции в среде SimInTech, включая схемы питания и алгоритмы работы релейной защиты и автоматики. На основе созданных моделей реализована система моделирования в режиме реального времени, позволяющая воспроизводить различные режимы работы и аварийные сценарии энергосистемы. Произведена интеграция физического терминала РЗА в цифровую среду моделирования путём организации обмена данными по протоколу ModbusTCP между математической моделью и устройством защиты, что обеспечило возможность апробации алгоритмов релейной защиты в условиях детализированного моделирования процессов.

Предложенный подход включает в себя построение комплексной модели подстанции в SimInTech, создание модуля преобразования данных между внутренним форматом модели и реального терминала, организацию каналов связи для двусторонней передачи данных, реализацию системы сценариев тестирования, воспроизводящих аварийные режимы работы.

Литература

1. **Новаш И.В.** Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 3.

А.В. Рогачёв, студ.;
рук. М.А. Федин, д.т.н., проф.,
рук. М.А. Булатенко, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ БЫСТРОЙ РАЗГРУЗКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В процессе эксплуатации газотурбинных электростанций (ГТЭС) нефтегазодобывающих компаний, имеющих собственную тепло- и электрогенерацию, была выявлена проблема, заключающаяся в отсутствии возможности контролируемого отключения потребителей электроэнергии при возникновении дефицита генерирующей мощности в результате незапланированных и вынужденных остановов энергоблоков [1, 2].

Для исключения «глубокой» просадки частоты в энергосистеме и выбора наилучшей комбинации отключаемых потребителей, обеспечивающей минимальное влияние на технологические процессы, имеющиеся на месторождении (отключение минимально необходимой нагрузки для стабилизации системы в аварийном режиме) предлагается внедрение избирательной автоматики быстрой разгрузки (ИАБР).

ИАБР позволяет обеспечить контролируемое отключение потребителей при аварийных остановах ГТЭС с учетом предустановленной необходимой приоритетности технологического оборудования, сохраняющей функционирование энергосистемы при авариях. Интеллектуальное противоаварийное управление ГТЭС минимизирует риски отклонения параметров вырабатываемой электрической энергии (частота и напряжение) от номинального значения с возможным последующим временным исчезновением напряжения на одной или двух секциях закрытых распределительных устройств (ЗРУ 10 кВ).

Внедрение ИАБР на нефтегазовых месторождениях, где собственная генерация электрической энергии является основным источником электроснабжения, соответствует экологической повестке в России за счет снижения потребления топливного газа на выработку электрической энергии (т.к. сокращается количество одновременно работающих ГТЭС) и, соответственно, уменьшения выбросов CO₂ и углеродного следа в целом.

Литература

1. **Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.** Интеллектуальное противоаварийное управление с учетом режимов работы потребителей // Вестник ИрГТУ. 2017. № 9 (128). С. 173–184.
2. **Сушков В.В., Хамитов Р.Н., Мартыанов А.С. и др.** Разработка алгоритма управления автоматической частотной разгрузкой для объектов нефтедобычи при возникновении аварийных ситуаций в электроэнергетической системе // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 8. С. 587–594.

Д.О. Ивашкин, студ.; рук. С.А. Цырук, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) инженерными и технологическими процессами представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, предназначенных для централизованного контроля, управления и оптимизации работы инженерных систем и технологического оборудования на производстве или в инфраструктуре. Преимущества внедрения АСДУ включают:

- Круглосуточный централизованный мониторинг и оперативное управление инженерными системами, что позволяет быстро реагировать на аварийные ситуации и снижать вероятность человеческих ошибок.
- Автоматизация сбора, обработки и архивации данных о состоянии оборудования и технологических процессов, что упрощает анализ, отчетность и принятие решений.
- Оптимизация режима работы оборудования и технологических процессов, что ведет к повышению надежности и эффективности эксплуатации объектов.
- Существенная экономия электроэнергии на фоне роста тарифов через интеллектуальное управление и оптимизацию энергопотребления.
- Возможность снижения пиковых нагрузок, высвобождение электрической мощности в энергосистеме, что уменьшает расходы предприятия на пиковую электроэнергию и повышает устойчивость энергоснабжения.
- Повышение энергоэффективности и сокращение эксплуатационных затрат за счет автоматического контроля и корректировки технологических режимов в реальном времени.
- Централизованное управление разнотипными системами и возможность поэтапного внедрения без остановки текущих процессов, что минимизирует риски и затраты на модернизацию.

Внедрение АСДУ способствует не только технологическому совершенствованию и повышению надежности инфраструктуры, но и дает значительные экономические преимущества за счет снижения потребления энергии, оптимизации использования мощностей и сокращения эксплуатационных расходов. Это делает АСДУ ключевым элементом модернизации и повышения конкурентоспособности предприятий в условиях постоянно меняющихся экономических и энергетических условий.

Р.И. Володкин; рук. Г.Р. Титова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ЦЕНТРАМИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Цифровую экономику невозможно представить без центров обработки данных (ЦОД), которые составляют основу критической ИТ-инфраструктуры государства. Стремительный рост числа ЦОД сопровождается ростом потребления электроэнергии (ЭЭ), что создает значительную нагрузку на энергосистемы. В условиях растущих тарифов на ЭЭ задача снижения энергетических затрат ЦОД приобретает первостепенное значение [1].

Оборудование ИТ-инфраструктуры и системы холодоснабжения являются наиболее энергозатратными в ЦОД. На систему холодоснабжения ЦОД может уходить до 45% всех энергозатрат в зависимости от расположения и конструкции ЦОД [2].

Энергопотребление ЦОД зависит от множества взаимосвязанных переменных. Факторы, влияющие на электропотребление, можно разделить на две группы: внутренние, обусловленные архитектурой и эксплуатационными режимами ЦОД, и внешние, не зависящие от объекта, но оказывающие существенное влияние на его энергетическую эффективность.

Внутренние факторы включают в себя режим работы ИТ-оборудования, инженерную инфраструктуру и др. К внешним факторам можно отнести климатические условия и расположение ЦОД.

Прогнозирование электропотребления ЦОД может быть осуществлено посредством статистического метода и метода искусственного интеллекта. Статистические методы не имеют возможности работы с искаженными и неполными данными.

Перспективно использование интеллектуального подхода к прогнозированию ЭЭ, основанного на интеллектуальном анализе данных для задачи прогнозирования потребления ЭЭ. В рамках данного подхода возможно использование математического аппарата рекуррентных нейронных сетей для прогнозирования потребления ЭЭ ЦОД.

Литература

1. **Касаткин, И.В.** Повышение энергоэффективности систем кондиционирования центров обработки данных // Вестник магистратуры. — 2020. — № 3-3(102). — С. 48–51.
2. **Dayarathna M., Wen Y., Fan R.** Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2016. — Vol. 18, no. 1. — P. 732–794.

Д.Н. Гусейнов, студ.; рук. М.Е. Вихров, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ

При проектировании умного здания — будь то офис, жилой комплекс или производственное помещение — важной задачей является автоматизация и систематизация освещения объекта. На рынке давно и прочно обосновались две европейские технологии, ставшие своего рода золотым стандартом: DALI и KNX.

Начнем с DALI (Digital Addressable Lighting Interface) [1]. Это цифровой интерфейс, и каждый элемент в этой системе — адресуемый. К каждому светильнику подводится не силовой кабель с выключателем, а две общие шины данных, по которым передаются цифровые команды. Каждому устройству — светильнику, драйверу, датчику — присваивается уникальный адрес.

Если задача стоит в создании единой системы для всего здания, то здесь подходит KNX [2, 3]. Принцип такой же — но масштаб совершенно иной. По одной и той же витой паре в KNX-системе «общаются» не только светильники, но и датчики присутствия, движения, температуры, модули управления розетками и многое другое.

С учетом новых геополитических и экономических реалий закономерно возникает вопрос: есть ли отечественные аналоги, способные заменить эти проверенные временем технологии? Одной из самых заметных и идеологически близких к KNX разработок является российская шинная система Rbus (или РБус). Это попытка создать именно открытый шинный протокол, аналогичный KNX, но с отечественной компонентной базой и программным обеспечением. Разрабатывается она компанией «Ноотехника» и другими партнерами.

Правильный выбор системы управления освещением сегодня — важная и ответственная задача. Если нужна максимальная эффективность и контроль именно над светом в сложном проекте — подойдет DALI. Если нужна надежная и комплексная система автоматизации, и бюджет позволяет, KNX — лучшее решение.

Литература

1. **Merenda G., Porcaro D., Iero D.** A Smart Lighting System Using DALI and IoT Technologies for Optimized Energy Management // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2020.
2. **Abidin I.Z., Zainuddin N.I.A., Megat Ali M.S.A.** Reliability Analysis of KNX Twisted Pair Communication // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, Vol. 10, No. 1.
3. **Маслов В.И., Петров А.А.** Анализ протоколов управления освещением для систем интеллектуального здания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3.

*Н.К. Карепов, студ.; Харун Гауи, асп.;
рук. К.Ф. Шараффедин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В ветроустановках нашли широкое применение асинхронные генераторы с фазным ротором, главные преимущества которых заключаются в простоте конструкции, надёжности, массовости и способности работать с переменной нагрузкой. Однако у таких генераторов есть существенный недостаток — это нестабильность напряжения и частоты.

Современные способы стабилизации напряжения и частоты асинхронных генераторов рассмотрены разными исследователями. В нашей работе предлагается решить эту проблему путём установки векторного частотного преобразователя (ЧП), который позволяет управлять реактивной мощностью и тем самым регулировать напряжение [1]. Также используют дополнительное статическое оборудование, а именно STATCOM и преобразователи источника напряжения. Не стоит забывать о классических батареях статических конденсаторов (БСК) и устройствах компенсации реактивной мощности (УКРМ), однако они имеют ряд существенных недостатков.

Надо отметить, что хорошим способом стабилизации напряжения является прогнозирование нагрузки и порывов ветра. По графикам нагрузки можно предсказать её пики и провалы для точного регулирования напряжения, а по метеорологическим данным за несколько лет можно предугадывать изменения ветра.

Таким образом, существует большое количество способов регулирования напряжения асинхронного генератора с фазным ротором. Каждый имеет свои достоинства и недостатки, но в предложенном нами методе можно добиться стабилизации напряжения на всей продолжительности работы, что отвечает нормам эффективного производства электроэнергии с хорошим качеством.

Литература

1. **Шарафеддин К.Ф., Цырук С.А., Сангов Х.С., Михеев Д.В.** Система автоматического регулирования напряжения трехфазного самовозбуждающегося асинхронного генератора ветроэнергетической установки // Промышленная энергетика. 2018. № 12. С. 33–41.

Н.К. Карепов, студ.; рук. М.А. Рашевская, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ЛИНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РОССИИ

На сегодняшний день в России нет ни одной действующей линии постоянного тока высокого напряжения. Вместе с тем их использование позволило бы существенно уменьшить потери электроэнергии в сетях.

Было проведено исследование основных проблем, препятствующих внедрению линий постоянного тока в России. Основные из них — проблемы коммутации, сложность и недоступность оборудования преобразовательных подстанций, разветвлённые линии, проблемы с безопасностью и с экономической эффективностью [1–3].

Главным ограничивающим фактором для развития линий постоянного тока является огромная стоимость проектирования и реализации. Коммутационное оборудование высокого и ультравысокого напряжения стоят в 100 раз дороже, чем на переменный ток. Это обусловлено сложностью конструкции, гегемонией на рынке, дорогостоящими компонентами и низкой серийностью. Ключевое звено преобразовательной подстанции — вентильные модули, которые состоят из тысячи силовых IGBT-тиристоров. Сюда же нужно складывать систему управления и защиты, а также систему охлаждения вентилялей.

Проблема с разветвлёнными линиями заключается в защите и селективности. Короткое замыкание протекает несколько быстрее, чем в сети переменного тока, поэтому нужно мгновенно обнаруживать и отключать повреждённый участок, не отключая всю сеть.

Таким образом, анализ проблем внедрения линий постоянного тока показал, что для их появления в России нужно совпадение ряда обстоятельств: нуждающегося мощного энергорайона, государственной заинтересованности и готовности нести колоссальные капитальные затраты.

Литература

1. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Некоторые особенности построения транспортных и распределительных сетей постоянного тока // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 6. С. 15–24.
2. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Управляющие и регулирующие устройства статических преобразователей в составе воздушных и кабельных линий постоянного тока // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 10. С. 17–32.
3. Шульга Р.Н., Иванов В.П. Выключатели постоянного тока для многоподстанционных сетей постоянного тока // Электричество. 2018. № 12. С. 28–33.

В.А. Гришин, студ.; рук. М.Е. Вихров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОЗВРАЩЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА: ОТ МАГИСТРАЛЕЙ ДО УМНОГО ДОМА

Исторический нарратив, описывающий развитие электроэнергетики, часто подается как победа переменного тока над постоянным. Однако постоянный ток уже не претендует на то, чтобы повсеместно заменить своего «переменного» собрата, но все чаще становится его стратегическим партнером, а в целых сегментах новой энергетики — безальтернативным лидером.

Камнем преткновения для DC была сложность преобразования напряжений [1]. Прорыв произошел с появлением мощных, быстрых и надежных полупроводниковых ключей — IGBT-транзисторов, а теперь и SiC- и GaN-приборов.

HVDC — передача высокого напряжения постоянного тока [2]. На передающей станции мощные выпрямители преобразуют переменный ток в постоянный с напряжением до 800 кВ и выше. По одной или двум линиям этот ток преодолевает тысячи километров с минимальными потерями.

Архитектура DC Microgrid [3] — в такой системе мощный выпрямитель на входе преобразует внешний переменный ток в постоянный. Этот стабильный DC разводится по всем серверным стойкам. Экономия энергии только за счет сокращения числа преобразований достигает 15–20%.

Концепция DC NanoGrid [4] предполагает создание внутри здания низковольтной DC-инфраструктуры. Энергия от солнечных панелей заряжает домашний аккумулятор. От него запитаны потребители через высокоэффективные инверторы.

Переменный ток с его простотой трансформации останется основой для распределения по сетям. Он нашел свою стратегическую нишу, став незаменимым инструментом там, где важны предельная эффективность, управляемость и прямая совместимость с технологическим укладом цифровой эпохи.

Литература

1. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 12-е издание, доп. М.: Юрайт, 2014.
2. **Maisam I., Panteleev V.** Control Strategies of the Electrical Complex of High- Voltage Electricity Transmission Lines of the Direct Current // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. Вып. 16(2). С. 120–137.
3. **Давыдов Г.И., Хоютанов А.М.** Разработка элементов Microgrid для оптимизации режимов энергопотребления в условиях севера // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 12-2 (75). С. 115–118.
4. **Einabadi N., Kazerani M.** Battery Nanogrids in Modern Power Systems: A Comprehensive Review // Smart Cities. 2025. № 8 (1).

Секция 34

ЭНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ

Energy of heat technologies

Председатель секции: к.т.н., доцент Степанова Татьяна Александровна

Секретарь секции: к.т.н., доцент Строгонов Константин Владимирович

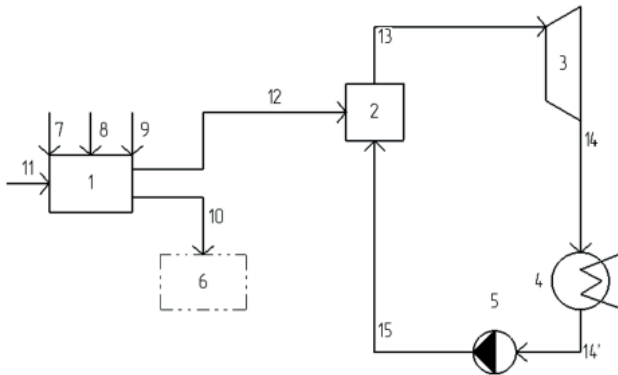
Д.О. Акиншин, студ.; рук. А.А. Валинеева, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

Твердые коммунальные отходы (ТКО) это — остатки сырья, материалов, иных изделий или продуктов, которые образовались в процессе производства или потребления. Каждый год в Российской Федерации образуется более 40 млн. тонн ТКО, 96% из которых подлежат захоронению, в основном, на полигонах(свалках), а переработке без вреда окружающей среде подвергается лишь малая часть (3–5%).

Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [1] отходы делятся на две группы: отходы потребления и отходы производства. Первая группа — это предметы, потерявшие свои функциональные качества в процессе физического и морального износа. Вторая группа — отходы производства, образованные в результате деятельности предприятий.

В данной работе в качестве решения проблемы накопления ТКО, предложена схема их термической утилизации с получением цементного клинкера на базе шлака ТКО.



- 1) плавильная печь; 2) котел-утилизатор; 3) паровая турбина; 4) конденсатор;
5) питательный насос; 6) производство цемента; 7) тко; 8) природный газ; 9) добавки;
10) шлак; 11) окислитель; 12) продукты сгорания; 13) перегретый пар;
14) влажный пар; 14') кипящая жидкость; 15) жидкость.

Литература

1. **Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 31.07.2025) «Об отходах производства и потребления»** // URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/ (Дата обращения 08.12.2025)

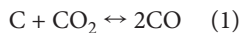
*А.А. Чечушкин, асп; Е.Г. Нешпоренко, к.т.н. доц.;
рук. С.В. Картавец, д.т.н., проф.
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск)*

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ CO₂ В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Выбросы парниковых газов в России за 2024 год составили 1,237 млрд тонн CO₂-экв. Значительный вклад вносят такие виды деятельности, как сжигание топлива, добыча и транспортировка ископаемого топлива, деятельность предприятий черной и цветной металлургии и химическая промышленность.

Для предприятий черной металлургии наибольшие выбросы CO₂ связаны с сжиганием топлива в энергопотребляющих установках (нагревательных печах, ТЭС, ТЭЦ и др.), а также при производстве кокса и чугуна. Основным потребителем кокса является доменная печь, производящая чугун, который в свою очередь является основным материалом в кислородно-конвертерном процессе. Снижение производства кокса можно добиться путем снижения расхода чугуна в кислородном конвертере. Этого можно достигнуть путем замены твердого лома на предварительно расплавленный лом в кислородно-конвертерном процессе [1]. В качестве источника энергии для получения жидкого лома имеется возможность использовать физический и химический потенциал конвертерного газа.

По действующей технологии твердый лом является охладителем плавки. Применение расплавленного лома приведет к росту температуры ванны свыше 1900°C во время продувки, что недопустимо для огнеупорных материалов и газового тракта. Следовательно, необходимо применение нового охладителя, например, диоксида углерода [2]. При подаче CO₂ в конвертер протекает реакция Будуара (1):



Данная реакция эндотермическая, что приводит к снижению температуры расплава. Варьируя расход подаваемого CO₂, контролируется температура ванны, а также снижается расход кислорода на продувку, улучшается перемешивание ванны и увеличивается выход конвертерного газа.

Литература

1. **Картавец, С.В.** Интенсивное энергосбережение в теплотехнологии производства конвертерной стали / С.В. Картавец, А.А. Чечушкин, Е.Г. Нешпоренко // Промышленная энергетика. — 2025. — № 5. — С. 39–44.
2. **Картавец, С.В.** Применение жидкого лома в конвертерном процессе / С.В. Картавец, Е.Г. Нешпоренко, А.А. Чечушкин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. — С. 136.

А.В. Липовый, студ.;
рук. К.В. Строгонов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИАЦИОННОГО РЕКУПЕРАТОРА

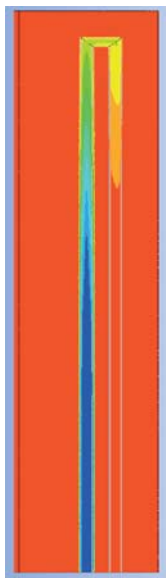


Рис. 1. Поле распределения температур теплоносителей в программе Ansys

Радиационные рекуператоры — теплообменники, в которых теплота передаётся от дымовых газов ($t \geq 900\text{--}1000^\circ\text{C}$) к нагреваемому воздуху (газу) излучением (радиацией). Такие рекуператоры широко применяются для утилизации теплоты дымовых газов высокотемпературных тепловых нагревательных печей различных производств [1].

Однако большие габариты приводят к потерям теплоты с уходящими из печи дымовыми газами и к снижению эффективности, объемов производства, дополнительным денежным затратам на топливо.

Целью работы является повышение эффективности радиационного рекуператора и интенсификации, путем решения следующих задач: повышение теплообмена и уменьшение габаритов [2].

Проводилось численное моделирование теплообмена в предлагаемой конструкции радиационного рекуператора (рис. 1). После применения U-образных труб температура газа на выходе снизилась с 1319 К до 1271 К, а температура воздуха увеличилась, что говорит о повышении теплоэффективности и снижении затрат на топливо. Годовая экономия природного газа при установке рекуператора — $V_r = 11260 \text{ м}^3/\text{год}$. Возможна разработка промышленных образцов и их внедрение в реальных производственных условиях.

Литература

1. **Рекуператоры для промышленных печей.** Тебеньков Б.П. М., «Металлургия», 1975, 296 с.
2. **Исследования и оптимизация высокотемпературных реакторов: учебное пособие** / К.В. Строгонов — М.: Издательство МЭИ, 2020. — 123 с.

Н.С. Мольков, асп.;
рук. О.Б. Колибаба, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРЕВЕСНОЙ ОПИЛОЧНОЙ МАССЫ В ПРОЦЕССЕ ГИДРОФОБИЗАЦИИ

Опилки являются дешевым и экологически чистым материалом, имеющим хорошую теплоизоляцию. Гидрофобизация — это обработка материалов специальными составами, с целью защиты от воздействия воды, что особенно важно для увеличения долговечности конструкции.

Высушенная древесная опилочная масса разной фракции подвергалась пропитке в гидрофобном растворе на основе ПВА и ГКЖ. По результатам обработки экспериментальных кривых сорбции, которые отражают зависимость между относительной влажностью воздуха ϕ и влагосодержанием материала U_p , был определен эффективный коэффициент массопроводности с использованием методики [1].

Из анализа построенных кривых можно сделать вывод о снижении равновесной влажности опилок после обработки гидрофобизатором, что говорит об уменьшении сорбции влаги. Результаты исследования показаны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования

Влажность воздуха ϕ , %	Влагосодержание материала U_p		
	Без обработки	Гидрофобизатор ГКЖ	Гидрофобизатор ПВА
35,5%	8,39%	7,11%	7,14%
75%	17,58%	25,95%	16,49%
96%	28,93%	57,43%	27,61%

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что опилки, пропитанные гидрофобизатором на основе ГКЖ, показывают снижение эффективности в условиях высокой влажности или их стремление к кумуляции влаги. При этом, материалы демонстрируют резкий рост показателей при 96% влажности воздуха, что свидетельствует о возможном разрушении или насыщении защитного слоя.

Обработка гидрофобизирующими веществами улучшает теплоизоляционные свойства древесной опилочной массы. Более стабильные результаты демонстрирует древесный материал, пропитанный гидрофобизатором на основе ПВА. Древесный материал, пропитанный гидрофобизатором на основе ГКЖ, требует осторожного применения из-за ярко выраженной зависимости от влажности.

Литература

1. **Е.В. Гусев.** Массопроводность дисперсных и листовых материалов в условиях термодинамического равновесия / Е.В. Гусев, А.И. Сокольский, А.А. Сергиенкова, Е.А. Шуина // Инженерно-физический журнал. — 2021. — Т. 94, № 3. — С. 712–720.

*Д.А. Шульга, студ.; И.И. Феоктистов, асп.;
рук. С.Н. Петин, доц., к.т.н.*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛЬНОСТИ ТВЁРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Контроль зольности топлива является критически важной задачей при оценке эффективности его сжигания на промышленных и энергетических предприятиях [1]. Методы определения зольности, регламентированные государственными стандартами [2, 3], основаны на гравиметрическом принципе — прокаливании навески топлива в муфельной печи при температуре 815°C до получения постоянной массы неорганического остатка. Несмотря на высокую точность и надежность, гравиметрические методы требуют значительных временных затрат (2–4 часа и более), что делает их малоприменимыми для оперативного контроля технологических процессов. Для решения этой проблемы наряду с методиками по ГОСТу разрабатываются альтернативные способы анализа зольности топлива, в том числе экспресс-методы.

Одним из наиболее перспективных экспресс-методов определения зольности является калометрический метод. Сущность этого метода заключается в исследовании зольного остатка после проведения калометрических испытаний, что позволяет существенно снизить временные затраты на анализ состава топлива, однако применение такого метода требует его проверки на точность и воспроизводимость.

В работе проводится сравнительный анализ методов определения зольности угля, мазута и гудрона с оценкой погрешности экспресс-методов. В ходе исследований проводятся параллельные опыты по определению зольности угля в муфельной печи методом ускоренного и медленного озоления с последующим сравнением с требованиями стандартов при оценке параметров неопределенности, представленных в [2, 3].

Литература

1. **Валинеева А.А.** Экспериментальное исследование свойств нефти и нефтепродуктов: практикум / Валинеева А.А., Петин С.Н., Попов С.К. // НИУ «МЭИ». — Москва: Изд-во МЭИ, 2024. — 88 с.
2. **ГОСТ 11022-95.** Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности: межгосударственный стандарт. — Взамен ГОСТ 11022-90; дата введения 1997-01-01. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 1996.
3. **ГОСТ 1461-75.** Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности. — Переизд. дек. 1991 г. с изм. № 1, 2, 3. — Взамен ГОСТ 1461-59; Введ. с 01.07.76 по 01.01.95. — Москва: Изд-во стандартов, 1992.

*М.С. Мосин, студ.; Д.В. Маленко, студ.;
рук. С.Н. Петин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ

Тепловую ценность топлива выражают через низшую и высшую теплоту сгорания, которые представляют собой количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании массовой единицы для твердых и жидких топлив или объемной единицы для газовых топлив. Низшая теплота сгорания меньше высшей на количество теплоты, которое затрачивается на нагрев и испарение воды, образующейся при сгорании топлива [1].

Точное знание этого параметра критически важно для расчета энергетических балансов технологических установок, проектирования горелочных устройств, нормирования расхода топлива. Сложный гетероатомный и углеводородный состав нефтепродуктов делает задачу точного определения теплоты сгорания нетривиальной. В современной практике существуют два различных подхода: экспериментальный и расчетно-модельный. Целью данной работы является теоретическое сравнение этих методов.

Представлен анализ двух подходов к определению теплоты сгорания нефтепродуктов: прямого экспериментального измерения методом калориметрии и косвенного расчета с использованием современных программных комплексов для моделирования химико-технологических процессов на основании данных фракционного состава нефтепродукта.

Для исследования требуемых свойств использовались стенды, расположенные на кафедре ИТНО НИУ «МЭИ»: бомбовый калориметр для определения теплоты сгорания по ГОСТ 21261-91 [2], аппарат АРН-ЛАБ-03 для определения разгонки нефтепродукта по ГОСТ 2177-99 [3]. В процессе исследования авиационного топлива ТС-1 были получены схожие данные в пределах воспроизводимости — 445 кДж/кг, нормируемой по [2], при этом расхождение низшей теплоты сгорания составило менее 1%.

Литература

1. **Валинеева А.А.** Экспериментальное исследование свойств нефти и нефтепродуктов: практикум / Валинеева А.А., Петин С.Н., Попов С.К. // НИУ «МЭИ». — Москва: Изд-во МЭИ, 2024. — 88 с.
2. **ГОСТ 21261-91** Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания.
3. **ГОСТ 2177-99** Нефтепродукты. Метод определения фракционного состава.

М.В. Стаканова, студ.; А.В. Бурмакина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Конвертерное производство стали является крупным источником выбросов оксида углерода CO, который в традиционной схеме частично дожигается на факеле с образованием CO₂, что приводит к безвозвратным потерям химической энергии и росту углеродного следа предприятий в окружающей среде. В связи с ростом тарифов на энергоносители, а также с ужесточением экологических норм актуальной задачей является разработка технологий, позволяющих не только утилизировать конвертерные газы, но и преобразовывать их энергию с максимальной эффективностью. А также особую проблему представляет переменный характер газовыделения в течение плавки, что затрудняет эффективную утилизацию данных газов и требует включения в схему регенеративного теплообменника (аккумулирующего тепло). Схема утилизации газов из [1], в которой используется их химическое и физическое тепло. Предложенная схема была проанализирована при различных режимах работы, варьируя величину подсоса воздуха после конвертера в диапазоне $\alpha = 0,1 \dots 1$. Для оптимизации технологической компоновки была модифицирована конструкция теплообменного аппарата.

Внедрение разработанной технологии позволит в перспективе повысить энергоэффективность металлургического предприятия за счёт генерации электроэнергии непосредственно в процессе каждой плавки. Одновременно будет достигнуто значительное снижение экологической нагрузки предприятия. Важным преимуществом предполагаемого решения является его адаптивность для предприятий, не имеющих возможности кардинально менять технологическую цепочку и инвестировать в дорогостоящее оборудование. Для её реализации потребуются установка ключевых, но стандартных узлов: камера сгорания, теплового аккумулятора и турбокомпрессорного модуля.

Литература

1. **Зубарев А.В.** Исследование системы использования конвертерных газов для выработки электроэнергии в газотурбинной установке: 05.14.04-Промышленная теплоэнергетика: Диссертация кандидата технических наук / МЭИ– 1979. — 167 с. : Прил.: Автореферат.

М.Д. Иванов, асп.; рук. С.В. Лукин, д.т.н., проф. (ЧГУ, Череповец)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ЗА СЧЁТ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛЯБОВ В МНЛЗ

В металлургических комплексах значительный объём теплоты, выделяемой при охлаждении жидкого металла, теряется без полезного использования. На пяти слабовых МНЛЗ ЧерМК ежегодно разливается до 9 млн тонн стали, что приводит к тепловым потерям порядка 1500 ГДж/ч. До 70% этой теплоты приходится на охлаждение кристаллизатора и роликов, что определяет высокий потенциал её утилизации.

Предложенная схема утилизации основана на повышении температуры охлаждающей воды без изменения конструкции кристаллизатора и роликов МНЛЗ. Обоснована возможность её нагрева до 90–100 °С в кристаллизаторе и до 80–100 °С в роликах при сохранении надёжности оборудования.

Рассчитаны параметры подогрева сетевой воды при различных режимах работы МНЛЗ, определён максимально возможный тепловой поток и потенциальная экономия условного топлива. Предложено использование промежуточного теплообменника для согласования тепловых потоков с графиком теплоснабжения предприятия.

Реализация предложенной схемы позволяет снизить расход топлива в пиковых котельных и обеспечить экономию до 86 млн м³ природного газа в отопительный период. Внедрение системы способствует снижению выбросов, повышению энергоэффективности производства и может быть масштабировано на другие металлургические предприятия.

Литература

1. Лукин С.В., Поселужный Д.В., Кибардин А.Н. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на МНЛЗ, в системе теплоснабжения предприятия. Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 7–9.
2. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Мухин В.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты в системе охлаждения МНЛЗ. Вестник ЧГУ. 2012. № 2. Т. 1. С. 11–14.
3. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Кочкин А.А. Исследование теплового баланса криволинейной МНЛЗ. Вестник ЧГУ. 2015. № 3(64). С. 29–32.

Т.А. Поляков, асп.; рук. С.В. Лукин, д.т.н., проф. (ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СЛЯБОВ НА УЧАСТКЕ МНЛЗ-НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ

Постановка проблемы. Одним из наиболее энергозатратных участков производства плоского проката является участок МНЛЗ-нагревательная печь, где энергоресурсы составляют до 3% себестоимости проката. Снизить затраты может «горячий посад» слабов в методические печи [1].

Актуальность. Для увеличения доли «горячего посада» требуется введение термостатирования сляба. Моделирование необходимо для разработки конструкции термосов стационарного и передвижного типа [2].

Научная новизна. Работа выполнена в рамках диссертации, цель которой — конструирование термосов, моделирование термостатирования слабов.

Целью исследования является моделирование теплового состояния слабов (таблица 1), в рамках существующего технологического процесса.

Задачи исследования. На данном этапе — определить параметры теплового состояния слабов, для определения характеристик термосов.

Основные результаты исследования. В ходе моделирования были получены основные показатели теплового состояния слабов в процессе прохождения ими участка МНЛЗ-нагревательная печь (таблица 1).

Таблица 1. Сортамент слабов, основные параметры теплового состояния

Длина, мм	Толщина, мм	Ширина, мм	Исходная Т °С	Конечная Т °С	Время t, сек.
5000–11500	200	1250–1850	950	100	63875
	250	1020–2000	950	100	66987
	315	1020–2000	950	100	74812
1700–8000	150	1000–1300	950	100	51418
	200	980–1580	950	100	62418

Полученные данные моделирования были сверены с результатами замеров температуры заготовок непосредственно на производстве.

Вывод. Таким образом в рамках моделирования нами были получены исходные данные для разработки конструкций термосов и моделирования теплового состояния заготовок в них.

Литература

1. Поляков Т.А. Поиск путей сокращения теплотерь на линии МНЛЗ — прокатный стан // Молодые исследователи — регионам: Мат. Междунар. конф., Вологда, 23 апреля 2024 года. — Вологда: ВоГУ, 2024. — С. 1303–1305.
2. Лапшин В.Ф. Определение потребительских свойств вагона-термоса для металлургических заготовок // Транспорт Урала. 2015 № 4 — С.48–53.

В.А. Мурашов, асп.; рук. К.В. Строгонов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВАКУУМИРОВАНИЯ

Одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности производства стали является переход на непрерывные процессы, в том числе и процесс вакуумирования. На текущий момент разрабатывается П-образная вакуум-камера непрерывного действия [1], которая согласно теоретическим выкладкам и результатам опережающей верификации в программном комплексе Ansys позволяет двукратно сократить время процесса вакуумирования стали.

Для верификации полученных математических моделей предлагается провести горячий эксперимент вакуумирования стали. Для чего был разработан концепт лабораторного стенда, представленного на рисунке 1.

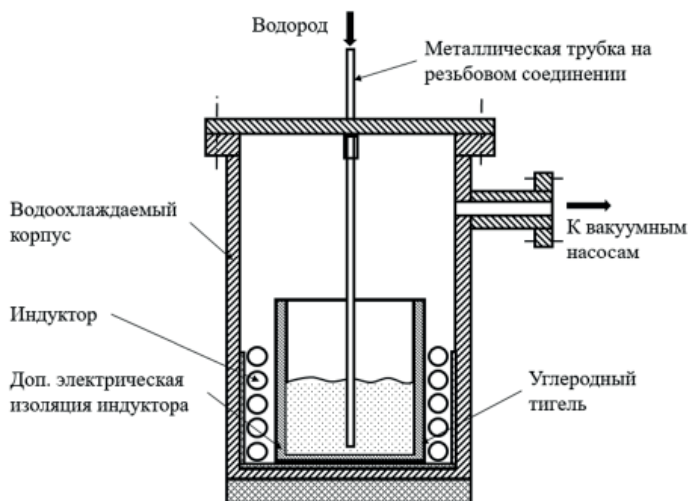


Рис. 1. Эскиз лабораторного стенда

Рабочее пространство лабораторного стенда состоит из газоплотной вакуум-камеры, индуктора, углеродного тигля и трубки для продувки расплава водородом.

Предполагается в едином агрегате осуществлять индукционное плавление стали, насыщение её водородом и обработку вакуумом.

Литература

1. Патент № 2806948 Российской Федерации МПК C21C 7/10 Агрегат непрерывного вакуумирования стали / Строгонов К.В., Мурашов В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»; № 2023108598; опублик. 08.11.2023, Бюл. № 31.

В.А. Мурашов, асп.; рук. К.В. Строгонов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ СИСТЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Разработка цифровых двойников для систем металлургических предприятий представляет собой одно из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации промышленности в контексте концепции «Индустрия 4.0» [1]. Металлургия относится к числу наиболее энергоёмких отраслей промышленности, где вторичные энергоресурсы (ВЭР) играют критическую роль в снижении затрат на производство и повышении экономической эффективности.

Разработка цифровых двойников требует интеграции трёх уровней автоматизации: SCADA (сбор данных), MES (управление производством) и ERP (управление ресурсами предприятия) (рис. 1). Математическое моделирование энергосистем может выполняться гибридным методом, сочетающим физико-математические уравнения теплопередачи и гидродинамики с алгоритмами машинного обучения.



Рис. 1. Три уровня автоматизации

Внедрение цифровых двойников на металлургических предприятиях по разным оценкам может обеспечить следующие практические результаты: сокращение простоев на 25%, повышение производительности на 15–20%, снижение энергопотребления на 12%, оптимизация расхода сырья на 8%. Экономический эффект может составить сотни миллионов рублей в год [2].

Литература

1. «Индустрия 4.0»: как металлургия внедряет информационные технологии // Металлоснабжение и сбыт. URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/141289> (дата обращения: 21.11.2025).
2. Цифровая трансформация // ММК. URL: <https://mmk.ru/ru/about/digital-transformation/> (дата обращения: 21.11.2025).

А.А. Сергиенкова, соиск.; Е.Н. Широбокова, студ.;
рук. Е.В. Гусев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-УСАДОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛИНОЗОЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

Повышение энергетической эффективности тепловой обработки влажного капиллярно-пористого материала требуемого качества в сушильном агрегате связано как с режимными параметрами (температура, скорость) теплоносителя, так и со структурно-деформационными изменениями высушиваемого тела. Основными характеристиками изделий из глинозольной керамики при оценке структурных изменений в процессе конвективной сушки являются средняя плотность и усадочные изменения [1].

В связи с этим были изготовлены пластинчатые глинозольные образцы-сырцы различного вещественного состава (Г:З) формовочной влажностью 20% способом прямого гидропрессования при удельных нагрузках уплотнения (1, 15, 20, 30 МПа), которые были подвергнуты тепловой обработке в сушильной камере при температуре 105°C до полного обезвоживания и определению объема и массы влажных и высушенных образцов.

В результате полученных данных были установлены зависимости средней плотности ρ_0 и объемной усадки глинозольного материала переменного вещественного состава от различной нагрузки уплотнения $\sigma_{\text{сж}}$ (рис. 1).

Полученные данные показывают, что объемная усадка глинозольных изделий снижается с увеличением содержания золы и нагрузки уплотнения, что говорит о возможности повышения интенсивности тепломассообменных потоков в процессе сушки за счет роста температуры и скорости сушильного агента и сокращения продолжительности тепловой обработки.

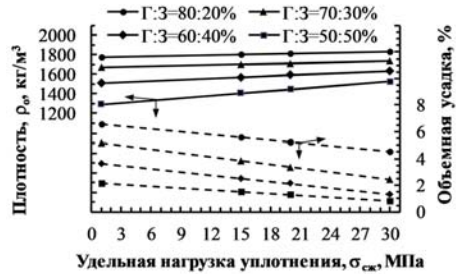


Рис. 1. Зависимости плотностей и объемной усадки глинозольного материала от нагрузки уплотнения

Литература

1. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1971.

В.Г. Пак, студ.; рук. Е.В. Гусев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЛИСТОВОГО ШПОНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Проектирование и выбор сушильного агрегата для обезвоживания листовых материалов (фибра, картон, шпона) основывается на информации о кинетических и структурно-деформационных закономерностях сушки и влиянии внешнего тепломассопереноса на повышение энергетической эффективности тепловой обработки [1].

В качестве объектов исследования использовались образцы листового шпона размером 100×50×1 мм хвойных пород древесины, применяемых в производстве фанеры и декорировании мебели.

Процесс сушки листовых образцов с влажностью 160% осуществлялся в сушильной камере с замкнутой рециркуляцией сушильного агента при различных режимных параметрах (температур $t_c = 80\text{--}150^\circ\text{C}$, скорости $v_c = 1,5\text{--}3$ м/с, относительной влажности $\varphi_c = 5\%$) в условиях двухстороннего продольного обтекания теплоносителем высушиваемого материала.

В результате исследований получены термовлажностные и усадочные закономерности листового шпона, по которым установлено, что с увеличением температуры и скорости теплоносителя интенсивность обезвоживания материала повышается и продолжительность термообработки существенно сокращается с повышением температуры от 80 до 150°C в среднем на 60%, а с ростом скорости воздуха от 1,5 до 3 м/с на 30–40%.

Выявлено, что существенное влияние усадочных изменений происходит по ширине (поперек волокон) листового шпона в сравнение с незначительной усадкой по его длине (вдоль волокон), что говорит о возможности проявления процесса коробления (изменения формы) высушиваемого материала и снижения его качества.

Усадочные изменения по ширине листового шпона происходят по линейному закону по выражению [1]

$$B = B_0 (1 + \beta_B U), \quad (1)$$

где B_0 — ширина сухого образца; $\beta_B = -0,0262 \ln(U) + 0,065$ — коэффициент линейной усадки по ширине (поперек волокон) шпона.

Из полученных экспериментальных данных по кинетике сушки и усадочного поведения листового шпона в процессе термообработки можно сделать предположение, что необходимо применять более низкую температуру сушильного агента и существенно повысить интенсивность теплообмена за счет роста скорости теплоносителя

Литература

1. **Стерлин Д.М.** Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1977.

Р.Б. Касумов, асп.; рук. С.В. Лукин, д.т.н., проф. (ЧГУ, Череповец)

СХЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДОМЕННОГО ШЛАКА, ОТВОДИМОГО В УСТАНОВКЕ ПРИПЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ ШЛАКА

Актуальность обусловлена значительными тепловыми потерями при грануляции доменного шлака и одновременной потребностью в подогреве природного газа для интенсификации доменной плавки. Решение проблемы утилизации бросового тепла шлака направлено на повышение энергоэффективности производства.

Новизна исследования заключается в разработке комбинированной схемы утилизации с размещением в вытяжной трубе установки припечный грануляции шлака (УПГШ) двух типов теплообменников: поверхностного пароводяного (ПВТ) для нагрева промежуточного теплоносителя и контактного теплообменника (КТ) для подогрева добавочной воды до 100°C, что обеспечивает постоянный нагрев природного газа.

Проведены экспериментальные исследования температурного режима УПГШ, разработана математическая модель теплового баланса и выполнена оптимизация параметров теплообменного оборудования. На основе анализа данных предложена концепция размещения теплообменных аппаратов в вытяжной трубе с минимальными изменениями существующей технологии.

Реализация проведенного исследования позволяет утилизировать 7,7% теплоты шлака для подогрева всего объема вдуваемого газа, что снизит удельный расход кокса. Система может быть тиражирована на другие доменные печи и предприятия.

Литература

1. **Артеев А.И., Ермоленко Н.М., Канев А.В.** Испытания утилизационных теплообменников УТ-1.5-0.6 // Газовая промышленность. 2004. № 6. С. 72–73.
2. **Фещенко С.А., Плешков В.И., Логинов В.Н., Курунов И.Ф., Ибадуллаев Т.Б., Арутюнов В.А., Левицкий И.А.** Синергетический эффект подогрева природного газа, вдуваемого в доменную печь // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2008. № 2 (1298). С. 52–56.

*Н.А. Шалыгин, В.А. Мурашов, студ.; Д.Д. Львов, асп.;
рук. К.В. Строгонов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПЛАН ЗАВОДА ПО ЖИДКОФАЗНОМУ ВОССТАНОВЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗА И ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Целью работы является разработка генерального плана металлургического производства для демонстрации применения сталеплавильных агрегатов непрерывного действия [1].

В ходе работы были поставлены следующие задачи:

- Составление списка основных агрегатов
- Подбор площадей цехов
- Разработка расположения цехов и инфраструктуры

Металлургический комплекс представляет собой технологически завершенное производство полного цикла, интегрирующее современные сталеплавильные технологии, энергоэффективные решения и развитую инфраструктуру.

Металлургический комплекс предусматривает три линии производства включающих в себя основные производственные элементы: сталеплавильный агрегат, агрегаты доводки стали, литейно-прокатное оборудование, складское помещение для хранения продукции. Три линии организованы с целью производства листа различной марки. Строительство предполагается проводить в 3 этапа:

- 1-ый этап: Строительство основной инфраструктуры, 1 сталеплавильный агрегат непрерывного действия (САНД)
- 2-ой этап: 1 САНД
- 3-ий этап: 1 САНД

Кроме основного производственного оборудования на предприятии предусмотрены коммуникации обеспечения бесперебойной работы, обеспечения безопасности производства, обеспечения комфортных условий труда для работников.

Производство характеризуется замкнутым технологическим циклом с максимальной утилизацией вторичных ресурсов и соответствует современным экологическим стандартам. Представленная инфраструктура обеспечивает высокую энергоэффективность и минимальное воздействие на окружающую среду.

Литература

1. **Каримова Т.П.** Основы металлургии. Курс лекций. — Ташкент: 2019. — 67 с.

*И.А. Аминева, асп; Е.Г. Нешпоренко, к.т.н., доц.
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПИРОЛИЗА МЕТАНА

В настоящее время основным промышленным способом производства углерода (в виде сажи или технического углерода) является процесс печного (канального) сажеобразования при температурном уровне 1200–1700°C [1]. Данный процесс реализуют путем неполного сжигания природного газа или мазута, а также термическое разложение углеводородов метанового ряда. Энергоёмкость тепло-технологии производства сажи составляет около 360–640 кг у.т./т сажи, что выше энергоёмкости теплотехнологии производства цемента (150–220 кг у.т./т) и сопоставимо с энергоёмкостью металлургической продукции.

Совершенствование энергетики технологической схемы производства сажи путем рециркуляции отходящих горячих газов на подмес к основному топливу позволило повысить тепловую эффективность с 30–40% до 75–85% с учетом внешнего теплоиспользования отходящих газов. Однако сам процесс печного сажеобразования не изменил своих энергетических и технологических характеристик: более 30–50% углерода сырья превращается в попутные газы (сажевый газ), при этом 1–5% теряется в виде несобранной сажи и непрореагировавших тяжелых фракций. Таким образом, выход годного продукта составляет около 45–65% от входящего потока.

В данной работе проведено исследование по построению энергоэффективной технологической схемы процесса пиролиза метана в части определения доли энергоресурса для собственного энергообеспечения процесса [2]. Получено, что с точки зрения энергетики эффективней организовать отбор готового продукта (горючего газа) на выходе из основного реактора и путем его сжигания подводить теплоту в основной реактор, чем сжигать долю входящего потока природного газа. При этом удельный расход первичного энергоресурса на 5% ниже на приведенный одинаковый выход готового продукта в виде сажеводородной смеси.

Литература

1. **Картавец, С.В.** Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА: Монография / С.В. Картавец. — Магнитогорск: МГТУ, 2000. — 188 с.
2. **Нешпоренко, Е.Г.** Моделирование теплового поля футеровки плавильной печи в фурменной зоне с применением пакета Comsol Multiphysics / Е.Г. Нешпоренко, И.А. Аминева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. — С. 140.

К.А. Шохова, студ.; рук. В.А. Щевьева, ст. пр. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗАГОРОДНОГО ДОМА

Эффективность систем теплоснабжений малоэтажных зданий во многом определяется правильным выбором оборудования и структуры затрат на его приобретение, монтаж и дальнейшую эксплуатацию. В работе рассмотрены тенденции развития отрасли теплоснабжения и проведен анализ современного рынка оборудования, включая наиболее распространенные в малоэтажном строительстве системы отопления — водяное отопление на базе газового и электрического котлов.

На основании анализа рынка сформированы варианты систем теплоснабжения для загородного дома площадью 100 м². Для каждого варианта определены капитальные вложения, особенности эксплуатации и факторы, влияющие на дальнейшие расходы на теплоснабжение. Для технико-экономического обоснования вариантов систем теплоснабжения применен критерий минимума затрат. По каждому из сравниваемых вариантов за весь срок службы рассмотрены суммарные приведенные капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

На основании выполненного анализа выявлены основные преимущества и недостатки исследуемых систем теплоснабжения, а также факторы, которые необходимо учитывать при выборе оборудования. При среднем тарифе на электроэнергию около 6,92 ₽/кВт·ч и среднем тарифе на природный газ для населения около 9,13 ₽/м³, расчёты показывают, что при одинаковой потребности в тепле эксплуатационные расходы газовой системы отопления для дома площадью 100 м² могут быть на 40–60% ниже, что делает газовый вариант более предпочтительным при долгосрочной эксплуатации. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего расчёта экономической эффективности и проектирования инженерных систем малоэтажных зданий.

Литература

1. **Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов** (Минэкономразвития, Минфин, Госстрой РФ) — [Электронный ресурс] — https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28224/
2. **СП 60.13330.2020 “Отопление, вентиляция и кондиционирование”** [Электронный ресурс] — <https://docs.cntd.ru/document/1200176881>
3. **Пособие по проектированию систем теплоснабжения жилых зданий** [Электронный ресурс] — clck.ru/3QDtXx

*В.Д. Преданников, асп; рук. Е.Г. Нешпоренко, к.т.н. доц.
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск)*

РАЗРАБОТКА СПОСОБА НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ СТАЛЬНОГО ЛОМА В ШЛАКОВОМ РАСПЛАВЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЁМКОСТИ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТОРНОГО ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ

Совершенствование энергетики металлургических процессов направлено в первую очередь на снижение их энергоёмкости и как следствие, на снижение потребления природных энергетических ресурсов. В кислородно-конвертерном производстве главным направлением снижения энергоёмкости является снижение доли чугуна, которое в настоящее время достигает 75% в общей массе плавки. Остальная часть — холодный стальной лом, который выполняет роль охладителя конвертерной ванны.

Предварительный нагрев стального лома в различных технических решениях [1] позволяет внести в процесс дополнительную теплоту с одновременным понижением доли чугуна [2]. Однако, в настоящее время разогрев стального лома осуществляют прямым контактом продуктов сгорания природного газа в зоне температур не более 400–600°C для того, чтобы исключить окисление лома, которое может достигать до 60% в зависимости от его толщины. Для исключения окисления лома предложено нагревать его в расплаве синтетического шлака. При этом на порядок увеличивается интенсивность процесса теплопередачи с 50 Вт/(м²·К) до 500 Вт/(м²·К), а при организации противоточного движения шлака и лома может достигать 1500–2000 Вт/(м²·К).

В работе предложен и исследуется способ организации раздельного нагрева циркулирующего синтетического шлака продуктами полного сгорания природного газа или любого другого вторичного газа металлургического предприятия с одновременным нагревом стального лома в расплаве шлака в другом элементе схемы. Затем охлажденный жидкий шлак снова поступает для высокотемпературного нагрева. Расплавленный стальной лом существенно снижает.

Литература

1. **Преданников, В.Д.** Разработка энергоэффективной схемы плавления стального лома в шлаковом расплаве / В.Д. Преданников, Е.Г. Нешпоренко, С.В. Картавцев // Промышленная энергетика. — 2025. — № 10. — С. 19–25.
2. **Картавцев, С.В.** Применение жидкого лома в конвертерном процессе / С.В. Картавцев, Е.Г. Нешпоренко, А.А. Чечушкин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. — С. 136.

*С.С. Орлова, студ.; М.А. Кислицын, асп.;
рук. С.Н. Петин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В НЕФТИ И ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКАХ

В условиях устойчивого тренда на повышение эффективности различных секторов промышленности, для нефтепереработки особую актуальность приобретает проблема полезного использования тяжелых нефтяных остатков (ТНО). Определенным вызовом для нефтеперерабатывающей промышленности в этом вопросе становятся тяжелые металлоносные нефти. Металлы, присутствующие в исходном сырье, при переработке аккумулируются в ТНО: мазуте, гудроне и битуме. Так, например, концентрация металлов в гудроне может в 3.5–4 раза превышать их содержание в нефти [1], достигая уровня, сопоставимого с бедными рудами. Учитывая, что переработка тяжелой нефти приводит к образованию значительных объемов тяжелых нефтяных остатков с высокой концентрацией металлов, рассмотрение полезной утилизации ТНО для получения ценных переходных металлов, таких как ванадий, никель и молибден, является актуальным решением проблемы использования ТНО. Внедрение технологий по определению и дальнейшему извлечению металлов из ТНО позволит нефтеперерабатывающим заводам (НПЗ) не только повысить общую рентабельность, эффективность и экологичность предприятия, но и внесет вклад в расширение продуктовой базы НПЗ.

Однако ввиду изменчивых составов перерабатываемой нефти появляется вопрос обоснования целесообразности извлечения металлов из них. Ответ на данный вопрос невозможен без анализа химических свойств нефти, в частности состава присутствующих металлов и доли их содержания [2]. В работе предложен метод по определению переходных металлов в нефти, характеризующийся высокой скоростью, низкой стоимостью и доступностью оборудования. Проведенная сравнительная верификация с существующими аналогами подтверждает эффективность и практическую целесообразность внедрения предложенного метода.

Литература

1. **Гатиятуллин И.Р.** Разработка методики количественного химического анализа ванадия и никеля в нефти сырой и нефти рентгенофлуоресцентным методом / Гатиятуллин И.Р., Бахтеев С.А., Юсупов Р.А. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 10.
2. **Кислицын М.А.** Исследование наличия переходных металлов в нефти, нефтепродуктах и тяжелых нефтяных остатках / М.А. Кислицын, С.С. Орлова, С.Н. Петин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. Тез. докл. — М.: ООО «ЦПУ „Радуга“, 2025. С. 697.

Д.В. Коробкин, студ.; рук. С.К. Попов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОПOTЕРЬ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЕ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Видимый расход топлива на ванную стекловаренную печь, определяемый из уравнения теплового баланса, зависит от теплового потока через ограждение печи теплопроводностью в окружающую среду. Результаты расчета данного теплового потока зависят не только от конструкции ограждения и теплофизических свойств материалов, его составляющих, но и от условий теплоотдачи на внешней поверхности ограждения печи.

Известен ряд соотношений для расчета α_k — коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности k -го элемента ограждения стекловаренной печи (свода, боковых стен и пода), что вносит неопределенность в процедуру теплотехнического расчета. Задача данного исследования — сопоставительный анализ зависимости расхода топлива и других показателей тепловой работы печи от выбора способа расчета коэффициентов теплоотдачи на наружной поверхности элементов ограждения.

Выделены две совокупности формул для расчета α_k : набор зависимостей вида $Nu = a \cdot Ra^b$, где Nu — число Нуссельта; Ra — число Рэлея; a и b — коэффициенты, полученные посредством регрессионного анализа результатов вычислительных экспериментов, выполненных в среде PHOENICS [1], и набор степенных функций вида $\alpha_k(t) = c + d(t - 20)^e$, где c , d , e — коэффициенты, зависящие от вида элемента ограждения [2].

Сопоставительный анализ выполнен в среде Mathcad на примере стекловаренной печи производительностью 250 т/сутки в системе производства стеклотары. Предварительно выполнены расчеты материальных балансов процесса горения и процесса стекловарения. Установлено, что расхождения в значениях коэффициентов теплоотдачи могут достигать 85%, температуры наружной поверхности — до 35%, однако это влечет за собой изменение расхода топлива не более чем на 0.16%.

В случае, если расходы топлива различаются более заметно, то согласно [1] рекомендуется в качестве искомой величины принимать среднее значение расхода топлива, а разность использовать как оценку доверительного интервала.

Литература

1. **Попов, С.К.** Расчет теплопотерь с наружной поверхности ограждения печи [Текст] / С.К. Попов, А.В. Коровяковский, Э.А. Сериков // Стекло и керамика. — 2019. — № 8. — С. 3–8.
2. **Топливные печи промышленных предприятий: учеб. пособие** / С.К. Попов, П.А. Стогов, И.Н. Свистунов, В.Д. Ванюшкин, А.В. Бурмакина. — М: Издательство МЭИ, 2023. — 220 с.

В.Р. Жихарева, студ.; рук. С.Н. Петин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА

В последнее время широкое применение получили различные виды газотрубных котлов. Однако, во многих источниках отмечается отсутствие открытой авторитетной методики по тепловому расчету данного типа котла. Существующие методики, предназначенные для расчета водотрубных котлов, характеризуются погрешностями ввиду различия конструкции, а также схемы движения теплоносителей. В связи с этим необходима доработка существующей методики, а также проведение численного моделирования и экспериментов для расширения научной базы.

Одной из рекомендаций по модернизации методики является добавление коэффициента внезапного расширения для топочной камеры в формулу М.А. Михеева по вычислению среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией при турбулентном течении [1].

В статье [2] исследуется увеличение интенсивности теплообмена при внезапном расширении трубы с устойчивым турбулентным потоком, а полученные результаты представлены в виде графиков как $Nu/Nu_{DB} = f(Re, d/D, X/H)$, где Nu — локальное число Нуссельта, масштабный коэффициент $Nu_{DB} = 50000$, Re — число Рейнольдса, d — внутренний диаметр пламенной трубы, D — внутренний диаметр жаровой трубы, X — осевое положение, $H = (D - d)/2$ — высота ступеньки. Таким образом, в зависимости от геометрии расширения рассматриваемого котла, а также длины топочной камеры и режима истечения, конвективная часть теплообмена может быть увеличена в 1,5–11 раз.

В настоящей работе проведена обработка данных из статьи [2], на основании которых исследовались несколько подходов по нахождению коэффициента внезапного расширения, а также проведена верификация полученных результатов с экспериментальными данными при работе газотрубного котла на различных нагрузках.

Литература

1. **Бухмиров В.В.** Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2007.
2. Local Heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Channel With Constant Wall Heat Flux / J.W. Baughn, M.A. Hoffman, R.K. Takahashi, B.E. Launder // J. Heat Transfer. 1984. V. 106. No. 4. P. 789–796.

Секция 35
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И МАШИНОСТРОЕНИИ
Innovation technology in thermal engineering

Председатель секции: д.т.н., проф. Соколов Владимир Петрович

Секретарь секции: к.т.н. Осипов Сергей Константинович

С.Ю. Кожевников, студ.; рук. Ю.Г. Коломиец, доц. (НИУ «МЭИ»)

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Кибербезопасность энергетических компаний сегодня приобретает ключевое значение, поскольку цифровизация отрасли приводит к росту числа уязвимостей и повышает вероятность атак, способных вызвать сбои в работе критически важных объектов. Большинство кибератак выявляется слишком поздно, когда ущерб уже нанесён, что делает необходимым комплексный пересмотр подходов к защите энергетической инфраструктуры. На фоне глобальных киберугроз энергетические предприятия становятся одной из наиболее привлекательных целей злоумышленников, а обеспечение их стабильной работы напрямую влияет на экономическую и национальную безопасность.

В научной литературе и нормативных документах преобладает технический подход к обеспечению цифровой безопасности энергетики. Исследователи подчеркивают роль специализированных технических средств, нормативных требований и систем мониторинга, позволяющих предотвращать несанкционированный доступ и кибервоздействия. В ряде работ акцент делается на необходимости совершенствования правового регулирования и сертификации программного обеспечения, применяемого в сфере ТЭК, а также создания структур, обеспечивающих взаимодействие государства и бизнеса в вопросах информационной безопасности. Отдельное направление исследований посвящено использованию искусственного интеллекта и интеллектуальных систем при мониторинге и обнаружении киберугроз. Однако наряду с техническими аспектами выделяется и важнейшее научное противоречие: преобладающие методы защиты оказались недостаточно эффективными в условиях стремительной эволюции угроз. Необходимо пересмотреть классические подходы к риск-менеджменту, дополнив их инструментами моделирования угроз, аналитическими системами реального времени и междисциплинарным взаимодействием специалистов. Важную роль играет и человеческий фактор: ошибки персонала становятся одним из основных векторов атаки, что требует усиления организационных и образовательных мер. [Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Кибербезопасность объектов электроэнергетики как фактор надёжности ЭЭС]. Исследование направлено на комплексную оценку уровня кибербезопасности энергетической отрасли и формирование практических рекомендаций по её повышению. В рамках работы планируется изучение нормативной базы, актуальных угроз, методик оценки риска, а также модернизация существующих подходов путём уточнения перечня угроз. Полученные выводы и предложенные решения станут основой для повышения устойчивости энергетического предприятия к киберугрозам, что особенно важно в условиях продолжающейся цифровизации и роста сложности атак.

Литература

1. **Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.** Кибербезопасность объектов электроэнергетики как фактор надёжности ЭЭС // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики: Сборник научных статей. Вып. 66.

В.А. Григоров, асп. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Экспериментальное исследование теплогидравлического состояния является неотъемлемым шагом при проектировании охлаждаемых лопаток газовых турбин. На сегодняшний день существует два основных вида таких исследований: 1) Испытание лопаток на газодинамическом стенде; 2) Метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате.

В ходе первого метода экспериментальные лопатки помещаются в газодинамический стенд, в котором условия работы приближаются к натурным [1]. Лопатки оснащаются датчиками температуры и давления, причем первые могут быть представлены в виде термопар, либо тепловизора. Несмотря на точность, данный метод требует больших затрат на создание сложной установки, при этом необходима высокая квалификация персонала и процесс препарирования лопаток является довольно долгим.

Суть метода калориметрирования в жидкометаллическом термостате состоит в следующем [2]. Рабочая лопатка погружается в горячий расплав цинка, после чего охлаждается вместе с расплавом до его кристаллизации. После достижения равновесной температуры лопатка продувается охлаждающим воздухом через внутреннюю полость пера в течение заданного промежутка времени. Далее лопатка извлекается из расплава с образовавшейся на ней цинковой коркой и после взвешивания корки, а также измерения ее толщины, определяются локальная плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи к охлаждающему воздуху.

Данный метод не требует столь больших трудозатрат, как метод испытаний на газодинамическом стенде, а отклонения значений теплового потока, отведенного от лопатки, от значений теплового потока, полученного по показаниям термопар, не превышают 8%. Таким образом, можно заключить, что оптимальным экспериментальным методом исследования теплогидравлических процессов в охлаждаемых лопатках является метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате.

Литература

1. **Хоменок Л.А.** Экспериментально-расчетные исследования охлаждаемых лопаток ГТЭ-65 // Теплоэнергетика. — 2008. — №. 1. — С. 42–46.
2. **Шевченко М.И.** Проектирование охлаждаемых деталей ГТД с опережающей верификацией теплогидравлических моделей на примере охлаждаемых лопаток газовой турбины : дис. — Нац. исслед. ун-т МЭИ, 2017.

М.С. Кожемякин, студ., М.Л. Голицын, студ.;
рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Объектом исследования является методика топологической оптимизации, реализованная на базе программного комплекса ANSYS. Валидация результатов топологической оптимизации проведена с помощью модуля ANSYS Design Validation System. Целью исследования была разработка методики, топологической оптимизации которая основана на распределении эквивалентных напряжений по Мизесу.

В расчётной модели использовались модули Static Structural и Structural Optimization. В качестве целевой функции оптимизации, по мимо снижения массы, задан учёт поля эквивалентных напряжений по Мизесу. По результатам проведённого расчёта в модуле Static Structural было получено поле распределения эквивалентных напряжений. На его основе модуль Structural Optimization построил новую геометрию с учётом локальных зон с минимальными и максимальными нагрузками. Получения таким образом геометрия переходит в модуль Design Validation System, где проходит процесс перерасчёта нагрузок в новой модели. В результате оптимизированная деталь снизила массу с 380 до 114 грамм. Также снизилась среднее значение эквивалентного напряжения в объёме детали с 126,35 до 63,7 Мпа. Результаты оптимизации представлены на рис. 1.

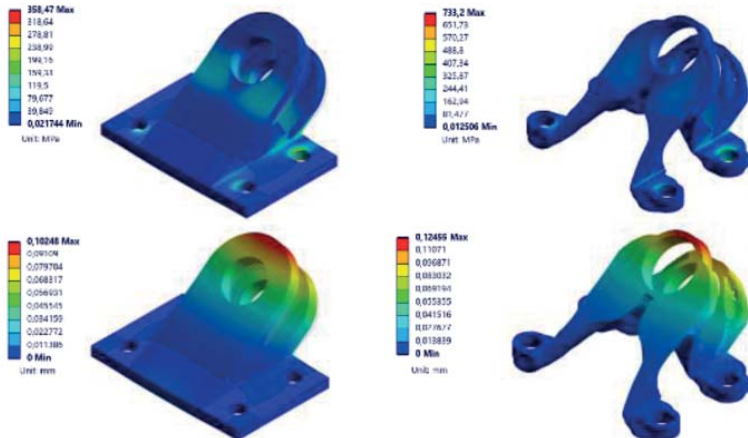


Рис. 1. Поля распределения эквивалентной нагрузки по Мизесу (сверху) и полной деформации (снизу)

Литература

1. Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts / K.V. Fetisov, P.V. Maksimov // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1015 — Art. 052006.

Д.В. Андриюшин, асп; рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПРЕССОРА ГТД

Объектом исследования является компрессор газотурбинного двигателя как математическая модель 1 рода. Проведено сравнение эффективности двух подходов для прогнозирования термодинамических параметров на выходе из узла и основных параметров компрессора: классического численного метода, основанного на решении системы нелинейных уравнений [1], и подхода с использованием машинного обучения (МО). Целью работы была оценка точности и скорости вычислительной эффективности данных методов.

В качестве классического подхода использовалось итерационное решение системы нелинейных уравнений неразрывности, адиабаты, энергии. Алгоритмы МО (линейная регрессия, деревья решений, случайный лес, бустинг) обучались на синтетических данных, сгенерированных данной классической методикой.

Сравнение моделей (таблица 1) показало, что градиентный бустинг является оптимальным, обеспечивая баланс точности и скорости. Линейная регрессия, ввиду простоты модели, показала наименьшую точность при высокой производительности. Алгоритмы решающего дерева и случайного леса подвержены переобучению.

Таблица 1. Сравнение регрессионных моделей МО для компрессора

Регрессионная модель	Время прогнозирования 3300 объектов, с	mae	mse
Linear	0.0007	50.47	4191
DecisionTree	0.0095	0.0000	0.0000
RandomForest	0.7887	0.0000	0.0000
GradientBoosting	0.1076	3.937	34.11

Результаты исследования свидетельствуют, что применение методов МО позволяет достичь существенного выигрыша в вычислительной скорости при сохранении удовлетворительной точности по сравнению с классическими методами, что перспективно для использования в проектировании компрессоров.

Литература

1. Л.Н. Дружинин, Л.И. Швец, А.И. Ланшин. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей. Труды ЦИАМ № 832. 1979.

*Л.С. Яновский, д.т.н., проф., В.М. Ежов, к.т.н., М.А. Ильина,
К.В. Шаранина (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)*

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАСЛОСИСТЕМ ГТУ В СРЕДЕ МАСЛА НА ОСНОВЕ ЭФИРОВ НЕОПЕНТИЛПОЛИОЛОВ

В настоящее время в маслосистемах газотурбинных установок (ГТУ) широко применяются уплотнения на основе фторсиликоновых и фторкаучуковых резин.

Масла на основе неопентилполиоловых эфиров обладают высоким уровнем смазочных свойств и термоокислительной стабильности, что обуславливает их выбор в качестве наиболее перспективных масел для высокотемпературных ГТУ на базе авиационных двигателей.

Известно, что масла на основе эфиров многоатомных спиртов обладают агрессивностью к уплотнительным материалам, что негативно влияет на ресурс маслосистемы и надежность эксплуатации ГТУ в целом [1, 2].

Штатный метод оценки воздействия масел на уплотнительные резины не позволяет определить динамику значений механо-прочностных свойств: предела прочности, накоплению остаточной деформации сжатия и изменения массы резин в зависимости от температуры. Целесообразно провести предварительные исследования влияния масел на уплотнительные резины в диапазоне температуры с целью определения критического значения температуры, при которой свойства резин резко снижаются, запас качества по совместимости с резинами и модернизация существующего метода оценки воздействия масел на уплотнительные резины.

Изучено воздействие перспективных масел на основе эфиров неопентилполиолов предел прочности, накопление остаточной деформации сжатия и изменение массы образцов резин марок ИРП-1316, ИРП-1287 и 51-1434 в диапазоне температуры 175–225 °С в течение 72 часов.

Разработаны рекомендации по применению уплотнительных материалов в среде масла на основе эфиров неопентилполиолов в обеспечение повышения ресурса маслосистем ГТУ.

Литература

1. **Сахин В.В.** Устройство и действие энергетических установок, Газовые турбины. Теплообменные аппараты: учебное пособие / В.В. Сахин; Балт. гос. техн. ун-т. — СПб., 2015. — 133 с.
2. **Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С., Осыка А.С.** Газотурбинные энергетические установки: учебное пособие для вузов, под ред. проф. В.Д. Бурова, — Москва: МЭИ, — 2024. — 428 с.

*М.А. Ильина, соиск.;
рук. Л.С. Яновский, д.т.н., проф.
(ФГБУН «ФИЦ ПХФ и МХ», г. Черноголовка)*

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ НА РЕСУРС МАСЛОСИСТЕМ ГТУ

Надежность и ресурс наземных газотурбинных установок (ГТУ) определяется эффективностью маслосистемы, обеспечивающей охлаждение и смазку узлов трения, а также восстановление масла: очистку от нерастворимых продуктов окисления масла и продуктов износа пар трения.

Эффективность маслосистемы ГТУ зависит от уровня эксплуатационных свойств масла, в том числе стойкости к термическому окислению с учетом влияния эксплуатационных примесей.

Развитие ГТУ связано с повышением их степени повышения давления и температуры рабочего тела на входе в турбину, увеличение механической и тепловой нагрузки на модули, что обуславливает проведение исследований в обеспечение создания и применения высокотермостабильных масел [1,2].

Важнейшей задачей является изучение кинетики изменения эксплуатационных свойств масел в условиях эксплуатации, в том числе с учетом эксплуатационных примесей [3].

Авторами построены математические зависимости физико-химических и эксплуатационных свойств масел от температуры и времени окисления с помощью известных подходов химической кинетики на основе экспериментальных исследований в диапазоне температур 175–240 °С.

Сделаны рекомендации по повышению ресурса маслосистем ГТУ на основе времени наработки до достижения предельно допустимых значений показателей свойств масел.

Литература

1. Кузнецов А.И., Топливо и смазочные материалы. Изд.: КолосС. Москва. 2007. С. 199.
2. Мичурин А.А., Иванов В.М., Шалыгин А.В. Опыт увеличения ресурса работы масла ТП-22С на турбоагрегатах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводного сырья. 2024. № 1-2. С. 77–81. DOI:10.24414/0131-4270-2024-1-2-77-81.
3. Д.В. Воскобойников, Б.А. Кесель. Способ увеличения срока службы моторного масла и повышение надежности трибологической системы ГТД // Известия Самарского научного центра российской академии наук. Механика и машиностроение. 2015. т. 17. № 2. С. 133–138.

*Д.В. Новаковский, В.М. Ежов,
М.А. Ильина, Н.А. Червонная, соиск;
рук. Л.С. Яновский, д.т.н., проф., чл-корр РАН
(ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка)*

ИЗУЧЕНИЕ ПЕРИОДА ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВЛЕНИЕМ БИОКОМПОНЕНТОВ МЕТОДОМ УДАРНОЙ ТРУБЫ

Для повышения энергоэффективности и экологичности наземных газотурбинных установок необходима оптимизация рабочего процесса камеры сгорания путем проведения численных исследований горения топлива с помощью детальных кинетических моделей горения. Разработка и валидация таких моделей требуют экспериментальных данных по кинетике воспламенения топлива.

Кинетика воспламенения топлив характеризуется величиной периода индукции воспламенения (ПИН), который может быть определён в широком диапазоне температур ($>1000\text{K}$), давлений и соотношения компонентов смеси с помощью ударной трубы.

В работе определены значения ПИН альтернативных топлив с добавлением биоспиртов и биоэфиров, в диапазоне температур 900–1700 К и давлений 1–2 бар. Изучено влияние компонентного состава топлива на значения его ПИН. Расширена база данных ПИН альтернативных топлив. Проведен анализ полученных и опубликованных данных по ПИН альтернативных топлив, а также анализ использованной методики измерений с оценкой диапазона ошибок полученных результатов.

Оценка достоверности результатов определения ПИН топлив на ударной трубе ФИЦ ПХФ и МХ РАН выполнялась по опубликованным данным n-додекана в диапазоне давления 1–2 бар и температуры 900–1700 К [1,2]. Показана удовлетворительная сходимость результатов.

Литература

1. Pfahl U., Fieweger K., Adomeit G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions. *Proc. Combust. Inst.*, 26, 781–789.
2. Zhaoming Mai, Yingtao Wu, Chenglong Tang, Haibao Mu, Wei Wang, Zuohua Huang Ignition delay time measurements and kinetic modeling for n-dodecane and methane blends at low-to-intermediate temperature conditions // *Combustion and Flame* Vol. 266, 2024, 113527 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113527>

Г.А. Тарасов, асп. (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И АРКТИКИ ПУТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Интенсификация деятельности в Арктике, включая развитие военной инфраструктуры, ведет к критическому накоплению техногенных отходов (ТБО, ГСМ, металлолом). Существующие программы ликвидации в России носят точечный характер, экономически неэффективны и не предотвращают образование новых загрязнений, создавая угрозу экосистемам и национальной безопасности.

Анализ методов утилизации для удалённых арктических объектов показал преимущество технологии газификации. Она обеспечивает энергетическую автономность, сокращает объем отходов до 95% и характеризуется минимальными выбросами по сравнению со сжиганием, что соответствует требованиям хрупких экосистем.

Предложена схема шахтного газификатора [1] с рециркуляцией синтез-газа и использованием инертного теплоносителя. Моделирование подтвердило устойчивость процесса для сырья с высокой и переменной влажностью (до 60%) и различным составом (пластики, биомасса, ГСМ). Рециркуляция позволяет стабилизировать температурный режим (~900°C) и обеспечивает полное обезвреживание.

Внедрение автономных модульных установок газификации на базе предложенной схемы является перспективным направлением для перехода от дорогостоящей ликвидации прошлого ущерба к системной, энергоэффективной и экологически безопасной переработке текущих отходов в Арктике, напрямую способствуя укреплению экологической безопасности региона.

Литература

1. **Polianczyk E., Tarasov G., Zaichenko A.** Gasification in the filtration combustion mode for disposal of medical waste with heat generation // E3S Web of Conferences. — 2024. — Vol. 474. — Art. No.01013.

*А.И. Костюк, студ.; Г.А. Герцовский, асп.;
рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО 3D-СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТУ ПРИ ОБРАТНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В условиях импортозамещения деталей узлов газотурбинных двигателей (ГТД) и других компонентов техники в аэрокосмической отрасли требуется за наименьший срок и с высокой детализацией оцифровать конструктивные элементы и получить 3D-модели деталей и конструкторскую документацию.

Для получения моделей многокомпонентных узлов и деталей сложной формы с высокой точностью (до 10 мкм) возможно использовать технологию обратного проектирования — 3D-сканирование [1]. Цель исследования — разработка рекомендаций по определению оптимального соотношения между детализацией полигональных 3D-моделей и временными затратами при сканировании деталей различных габаритов и форм.

При эксперименте определялся шаг сетки (расстояние между точками), который влияет на детализацию поверхности полигональных 3D-моделей. В качестве объекта определены узлы деталей ГТД: вал крыльчатка и камера сгорания микро ГТУ Capstone C65, лопатка турбины Siemens SGT600.

Размерные отклонения, полученные контактным методом с использованием измерительных инструментов, были сопоставлены с отклонениями размеров на сканированных моделях в ПО постобработки Geomagic Design X. Таким образом, была установлена критериальная зависимость шага сетки от габаритных размеров модели (рисунок 1).

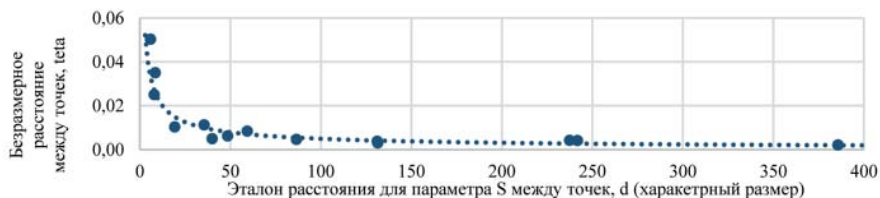


Рис. 1. Соответствие заданного расстояния между точек (r) характерному диаметру детали

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методов автоматизации процесса обратного проектирования деталей и рекомендаций для их последующего изготовления» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. **Bauer F., Schrapp M., Szijarto J.** Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing // Precision Engineering. — 2019. — Т. 60. — С. 63–75.

*С.А. Загородников, аспирант;
М.В. Силуянова, д.т.н., профессор (НИУ «МАИ», Москва)*

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА И ОПТИМИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ПОД КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Повышение эффективности газотурбинных установок (ГТУ) требует газодинамического совершенства проточной части, особенно зоны под камерой сгорания (КС). Оптимизация геометрии этого узла — трудоемкий итерационный процесс, что обуславливает актуальность создания специализированных средств автоматизации [1]. Для решения этой задачи разработан программный комплекс, интегрирующий в единый цикл расчёт одномерного течения газа, параметрическую оптимизацию геометрии тракта и подготовку данных для CAD/CAE-систем.

Авторами выполнен полный цикл разработки: создана математическая модель на основе уравнений сохранения, реализован алгоритм оптимизации профиля площади и написан интерфейс программы на языке C#. Реализованы ключевые функции — генерация контура для 3D-моделирования, ведение архива расчётов и экспорт данных [2].

Верификация работы комплекса проведена сравнением полученных оптимальных геометрий и расчётных параметров течения с результатами моделирования в пакете ANSYS CFX, показавшим хорошую сходимость. Перспективы использования связаны с циклом проектирования ГТУ, позволяя сократить время на подготовительные расчёты и количество CFD-моделирований.

Литература

1. **Силуянова, М.В.** Исследование тепловых характеристик турбореактивных двигателей методом математического моделирования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2016 — № 1. — С. 57–68.
2. **Загородников С.А., Силуянова М.В.** Программное обеспечение для автоматизированного расчёта и проектирования областей под камерой сгорания газотурбинных двигателей с закрытой накопительной базой (Genesis 1.2) : Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025690006 Рос. Федерация : заявл. 29.10.2025 : опубл. 19.11.2025 // Заявитель ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт».

*А.И. Костюк, студ.; Г.А. Герцовский, асп.;
рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ОРИГИНАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ОТ ЕЕ КОПИИ, ПОЛУЧЕННОЙ В ПРОЦЕССЕ ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В условиях необходимости локализации производства запасных частей для энергетического оборудования особую актуальность приобретает задача верификации точности обратного проектирования. Одним из важных этапов является оценка соответствия геометрии восстановленной детали исходному образцу. В данной работе предложена методика определения отклонений размеров оригинальной детали от её копии, полученной с использованием технологий 3D-сканирования и аддитивного производства.

В качестве объекта исследования была выбрана лопатка турбины Siemens SGT600. На первом этапе выполнена оцифровка детали с помощью 3D-сканера Shining 3D FreeScan UE Pro с последующим построением твёрдотельной модели в среде Geomagic Design X. Далее осуществлена 3D-печать физической копии лопатки методом селективного лазерного сплавления (SLM). Для количественной оценки точности воспроизведения геометрии проведено сканирование изготовленной копии и сравнение полученного облака точек с исходной CAD-моделью в программном комплексе Geomagic Control X.

Анализ отклонений проводился по методике Bauer et al. [1]. В её основе лежит сравнение величин отклонений на разных участках детали для определения двух типов погрешностей: постоянной систематической ошибки (сдвига) и случайных разбросов (стандартного отклонения). В результате анализа построены зависимости отклонений, также были определены систематические погрешности процесса обратного проектирования.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методов автоматизации процесса обратного проектирования деталей и рекомендаций для их последующего изготовления» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. **Bauer F.** et al. Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing // Precision Engineering. — 2019. — Т. 60. — С. 63–75.
2. **Lyngby R.A.** et al. Development and metrological validation of a new automated scanner system for freeform measurements on wind turbine blades in the production // Precision Engineering. — 2019.

*Т.М. Миронова, студ.; Г.А. Егоров, студ.;
Ю.В. Проскурин, к.т.н. (НИИ Транснефть);
рук. Е.С. Садовников (НИИ Транснефть)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ВНУТРЕННЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Одним из эффективных способов снижения выбросов вредных веществ в котельных установках является рециркуляция дымовых газов. Реализовать внутреннюю рециркуляцию дымовых газов в котельных установках возможно за счет специальной конструкции горелочных устройств. Горелочное устройство с внутренней рециркуляцией дымовых газов — это устройство, предназначенное для значительного снижения выбросов оксидов азота (NO_x) при сжигании топлива. Принцип работы основан на том, что дымовые газы, образующиеся в процессе сгорания топлива, циркулируют и подмешиваются к топливу или окислителю. Это приводит к снижению температуры в топке, за счет чего снижается уровень выбросов оксидов азота.

В источнике [1] представлена конструкция горелочного устройства с технологией внутренней рециркуляции дымовых газов, которая была использована в качестве прототипа в настоящей работе.

Конструкция представляет собой комбинированное устройство, в котором рециркуляция дымовых газов организована одновременно для центральной и нескольких периферийных радиально расположенных горелок (рисунок 1). По результатам численного моделирования установлено, что использование горелочного устройства с технологией внутренней рециркуляции дымовых газов позволяет снизить оксиды азота на 40–50%.

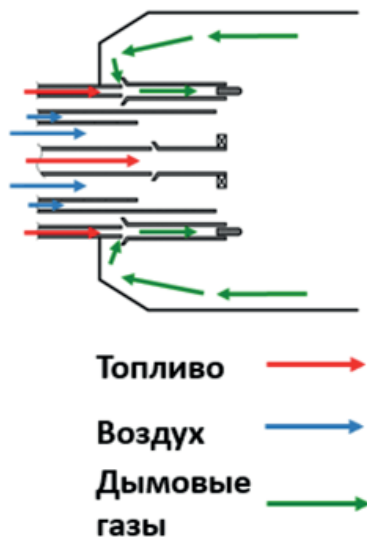


Рис. 1. Горелочное устройство с внутренней рециркуляцией дымовых газов [1]

Литература

1. Kim J.H., Lee S.Y. Burner for generating reduced nitrogen oxide through forced internal recirculation of flue gas: пат. KR101203189B1 USA. — 2012.

Секция 36

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Energy systems and complexes

Председатель секции: д.т.н., доцент Рогалев Андрей Николаевич

Секретарь секции: к.т.н., доцент Киндра Владимир Олегович

*Д.С. Ковалев, асп.; К.Ф. Калугина, студ.;
рук. В.О. Киндра, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАННОГО ПАРА

Применение абсорбционных тепловых насосов (АБТН) для утилизации низкопотенциальной энергии отработанного пара турбин ТЭС и АЭС является эффективным способом производства теплоты [1].

В настоящей работе проведен сравнительный термодинамический анализ технологических схем одноконтурных и двухконтурных АБТН мощностью 300 кВт, работающих на рабочих парах $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ и $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$. В качестве источника низкопотенциальной теплоты рассматривался отработанный пар паровой турбины марки К-4,9-4,4Р. Давление в конденсаторе составляло 0,686 кПа.

По результатам математического моделирования установлено, что при оптимальных сочетаниях параметров максимальное значение коэффициента преобразования тепла (COP), равное 1,9 (рис. 1), достигается в случае применения одноконтурной АБТН, работающей на паре $\text{H}_2\text{O}/\text{LiCl}$. При этом для ее работы необходимо обеспечить подвод пара из отбора паровой турбины с массовым расходом 0,07 кг/с, температурой 102°C, давлением 1,2 бар, в результате чего отпускаемая электрическая мощность паротурбинной установки снижается на 21,8 кВт.

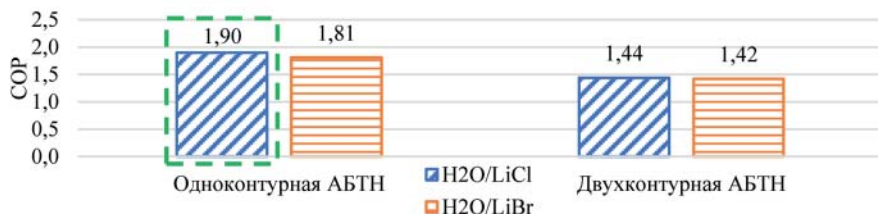


Рис. 1. Влияние выбора типа ПКТН и вида хладагента на COP

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-30037, <https://rscf.ru/project/25-79-30037/>

Литература

1. Маленков А.С., Шелгинский А.Я. Анализ эффективности использования абсорбционных холодильных машин в системах теплохладоснабжения предприятий // Промышленная энергетика. — 2013. — №. 6. — С. 16–20.

*Д.С. Ковалев, асп.; К.Ф. Калугина, студ.;
рук. В.О. Киндра, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАННОГО ПАРА

Применение парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) для утилизации низкопотенциальной энергии отработанного пара турбин ТЭС и АЭС является эффективным способом производства теплоты [1].

В настоящей работе проведен сравнительный термодинамический анализ технологических схем ПКТН одноступенчатого, двухступенчатого и каскадного типа, работающие на хладагентах R717, R401A и R134a. В качестве источника низкопотенциальной теплоты рассматривался отработанный пар паровой турбины марки К-4,9-4,4Р. Давление в конденсаторе составляло 0,686 кПа.

По результатам математического моделирования установлено, что при оптимальных сочетаниях параметров максимальное значение коэффициента преобразования тепла, равное 5,8 (рис. 1), достигается в случае применения парокомпрессионных теплонасосных установок наблюдается для каскадной ПКТН, в которой в качестве хладагента используется фреон R401A.

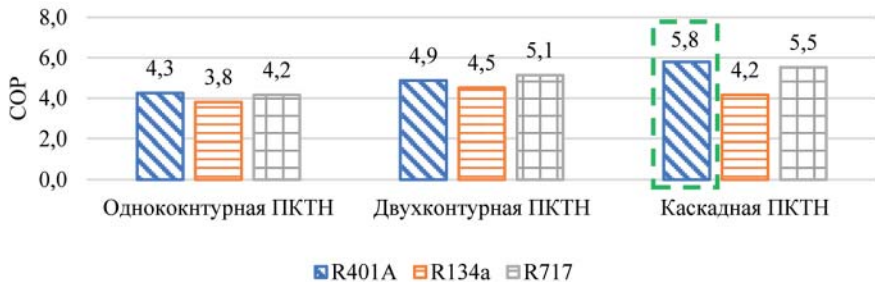


Рис. 1. Влияние выбора типа ПКТН и вида хладагента на COP

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-30037, <https://rscf.ru/project/25-79-30037/>

Литература

1. Романюк, В.Н., Бобич А.А., Мальков С.В. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ // Энергия и Менеджмент. — 2013. — № 4-5. — С. 18–21.

*Р.Е. Зуйкин, студ.; М.А. Островский асп.;
рук. В.О. Киндра, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДА НА ПАРОВОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ТРИНАРНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Самый эффективный способ генерации электроэнергии в больших объемах при сжигании органического топлива — это комбинированные циклы на базе газовой турбины. Повысить эффективность таких циклов можно, за счет перехода от бинарного к тринарному циклу [1], а также путем замены воздушного хладагента на паровой [2].

В настоящей работе изложен разработанный подход к оценке изменения относительного расхода хладагента g с переходом от воздушного к паровому:

$$g = \frac{\rho_1 \cdot v_1}{\rho_2 \cdot v_2} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{-0,85} \cdot \left(\frac{Pr_{1w}}{Pr_{2w}}\right)^{0,3125} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-1,25} \cdot \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)^{-1,25} \quad (1)$$

Рассмотрено два возможных источника пара для охлаждения газовой турбины: поверхности нагрева котла-утилизатора (схема 1) и отбор паровой турбины (схема 2). Установлено, что максимальный прирост КПД нетто, равный 1,23%, достигается в случае забора пара из отбора паровой турбины (рис. 1).



Рис. 1. Сравнение влияния различных способов охлаждения газовой турбины на энергоэффективность тринарной энергоустановки

Литература

1. Киндра В.О., Наумов В.Ю., Скляр Н.С., Львов Д.Д., Максимов И.А. Тринарные энергетические циклы для высокоэффективного производства электроэнергии из ископаемого топлива // Новое В Российской Электроэнергетике. — 2022. — № 4. — с. 7–25.
2. Рогалев Н.Д., Рогалев А.Н., Киндра В.О., Максимов И.А., Зуйкин Р.Е. Разработка И Исследование Тринарных Энергоустановок С Паровым Охлаждением Газовых Турбин // Глобальная Энергия. — 2024. — Т. 30. — № 4. — С. 7–23.

*С.В. Полхов, ген. директор ГУП ДНР «Донбасстеплоэнерго»;
рук. А.Б. Бирюков, д.т.н., проф. (ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ

Для анализа технико-экономической эффективности котельных или групп котельных, входящих в структуру теплогенерирующих предприятий, предлагается использовать систему критериев [1]. Предлагаемая система критериев была разработана как на основе известных подходов для оценки показателей работы котельных [2–3], так и за счет введения новых критериев, целенаправленно разработанных для анализа эффективности работы объектов теплоэнергетики.

С помощью рассматриваемой системы критериев был проведен анализ эффективности работы двух котельных. Полученные результаты анализа позволили сопоставить эффективность котельных между собой, проанализировать эффективность их работы в разрезе общей эффективности работы теплогенерирующего предприятия и определить потенциал для модернизации с целью повышения энергоэффективности.

Таблица 1. Расчетные критерии эффективности котельных

Месяц	$t_{\text{ext}}, ^\circ\text{C}$	η_n		$k_{\text{всп}}$		$\eta_{\text{общ}}^{\text{эп}}$		$b_{\text{усл}}$	
		Кот. № 1	Кот. № 2	Кот. № 1	Кот. № 2	Кот. № 1	Кот. № 2	Кот. № 1	Кот. № 2
Октябрь	7.3	0.83	0.61	0.019	0.036	0.82	0.59	171.68	235.37
Ноябрь	3.2	0.83	0.72	0.026	0.033	0.81	0.71	172.82	197.10
Декабрь	0.3	0.83	0.73	0.026	0.029	0.81	0.71	172.78	195.72
Январь	1.4	0.83	0.67	0.026	0.031	0.81	0.65	172.54	213.80
Февраль	-6.2	0.83	0.73	0.021	0.023	0.81	0.71	172.42	196.73
Март	6.7	0.83	0.65	0.036	0.044	0.80	0.63	173.12	219.06
Апрель	7.6	0.83	0.61	0.070	0.088	0.78	0.58	172.78	234.58

Литература

1. **Бирюков А.Б., Полхов С.В.** Система критериев для оценки уровня энергоэффективности, технико-экономических и экологических показателей работы котельной // Энергетические системы, 2025, № 10.
2. **Роддатис К.Ф.** Котельные установки. Учеб. пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов. М., «Энергия», 1977.
3. **Либерман Н.Б., Нянкoвская М.Т.** Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения: (Общие вопросы проектирования и основное оборудование). — М.: Энергия, 1979.

А.А. Ухлин*, асп.; рук. В.И. Брезгин**, д.т.н., проф.
(*АО «УТЗ», **УрФУ, г. Екатеринбург)

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ОТБОРА ПАРА НА ОСНОВНОЙ ПОТОК

В контексте развития энергетической отрасли в направлении строительства пылеугольных энергоблоков на суперсверхкритических параметрах свежего пара, требования к экономичности проточной части паровой турбины принимает острый характер, поскольку стоимость энергетического оборудования существенно повышается в связи с применением высоколегированных жаропрочных сплавов.

Паровые турбины характеризуются развитой системой регенеративного подогрева для повышения экономической эффективности паросилового цикла. Кроме того, зачастую присутствуют регулируемые отборы пара на собственные нужды ТЭС, отборы пара на производство, а также на теплофикационную установку для нужд отопления и горячего водоснабжения.

Исследований, направленных на определение влияния отбора пара на основной поток относительно мало, и главным образом посвящено нерегулируемым отборам, что характеризуется величиной до 10%. При этом влияние на КПД отсека зависит от места отбора — при малых углах раскрытия ($\sim \alpha < 8^\circ$) наблюдается отрицательный рост КПД, а при больших ($\sim \alpha > 18^\circ$) — положительный. Однако сложно сформулировать точные критерии, поскольку величина потерь по высоте пера лопатки в районе щелевого зазора зависит от совокупности факторов: профилирования, режима течения, геометрии зазора и проточной части.

В случае увеличения расхода пара свыше 13% наблюдается снижение КПД отсеков независимо от места расположения отбора. Для нивелирования данных эффектов разработаны варианты дефлекторов как для прикорневых зон, так и прищелевых зон [1]. Однако данные решения показывают фактическую эффективность только в районе номинального (проектного) режима. Их принципы основаны на теории пограничного слоя, характеристики которого меняются в зависимости от режима течения и величины отбора.

Таким образом, для больших отборов пара целесообразна разработка дефлекторов с изменяемой геометрией.

Литература

1. **Парамонов, А.Н.** Разработка и исследование систем нерегулируемых отборов турбин ТЭС и АЭС: 05.04.12-Турбомашины и турбоустановки : Диссертация кандидата технических наук / А.Н. Парамонов, Моск. энерг. ин-т (МЭИ). — 1990. — 168 с.

*В.Р. Жихарева, Н.М. Бонадыков, студенты;
рук. С.Н. Петин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАЗОТРУБНОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА

В условиях постоянно меняющихся нагрузок и внешних факторов, с которыми сталкиваются современные теплоэнергетические установки, традиционные статические методы расчета уже не способны обеспечить необходимую точность и полноту описания процессов, происходящих в котле. Динамическое моделирование котельных агрегатов позволяет более точно прогнозировать их поведение в различных режимах работы.

В настоящей работе была разработана динамическая модель в программе российского производства SimInTech. Исходные данные вносились из режимной карты газотрубного водогрейного котла, который способен обеспечить высокую производительность, несмотря на свою простую конструкцию, а расчетные модели по теплообменным процессам на основании программы для ЭВМ [2]. В программе SimInTech расчет процесса горения и теплообмена производится в схеме модели общего вида, а водяной тракт моделируется в теплогидравлической схеме «HS-теплогидравлика». Связь между двумя схемами происходит через сигналы базы данных.

С помощью таких динамических моделей, способных учитывать переходные процессы работы оборудования, появляется возможность отследить выбросы вредных веществ от энергетического объекта, исследовать режимы работы данного оборудования при переходе на другой вид топлива, прогнозировать будущие нагрузки и с учетом этого оптимизировать расход топлива.

Была проведена верификация полученных значений параметров модели с данными режимной карты котельного агрегата при различных режимах работы. Отклонение модельных данных не превышает 2%, что подтверждает адекватность динамической модели.

Литература

1. Справочная система SimInTech (v04.09.2025) [Электронный ресурс]. URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/browsers.html (дата обращения: 26.09.2025).
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682609 Российская Федерация. Программа для исследования газотрубных водогрейных котлов: № 2024681773: заявл. 23.09.2024: опубл. 25.09.2024 / В.Р. Жихарева, С.Н. Петин, А.В. Бурмакина, Н.М. Бонадыков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

П.В. Голосова, студ.; В.С. Яковлев, студ.; Т.М. Миронова, студ.;
рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО ГОРЕНИЯ

Объектом исследования является лабораторный стенд с вихревым горелочным устройством, в которое подается природный газ, CO_2 и O_2 и осуществляется кислородно-топливное сжигание. Валидация численной модели проведена по экспериментальным данным. Целью испытаний было определение влияния массового содержания CO_2 в смеси окислителя и разбавителя на стабильность пламени и состав продуктов сгорания.

В расчетной модели использовались модели горения Partially Premixed Combustion, Non-Premixed Combustion с кинетическим механизмом UoS [1], и Eddy Dissipation.

В эксперименте измерялась температура потока с помощью четырех термпар. Результаты сравнения температур экспериментального стенда и численного моделирования представлены на рис. 1. Результаты, полученные с помощью модели Partially Premixed Combustion, имеют наименьшее расхождение с экспериментом: 8–16%. Наибольшее расхождение в точке T4 (около 16%) связано со скоростью смешения компонентов, что можно учесть изменением значения турбулентного числа Шмидта. Наименьшая численная погрешность (менее 8%) наблюдается при значении $Sc=0,3$.

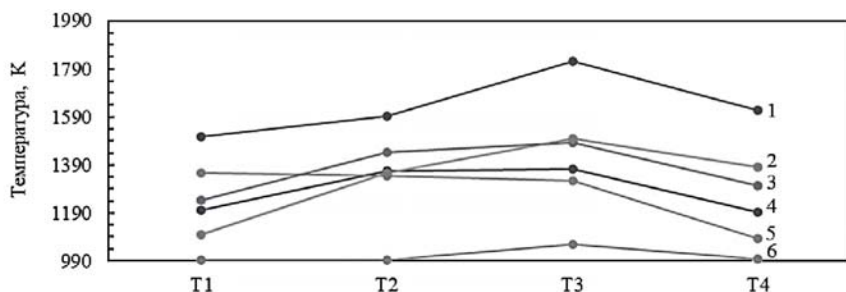


Рис. 1. Значения температур, полученные в результате экспериментального и численного моделирования процессов: 1 — Eddy-Dissipation; 2 — Partially Premixed ($Sc=0,85$); 3 — Partially Premixed ($Sc=0,3$); 4 — Эксперимент; 5 — Partially Premixed ($Sc=0,1$); 6 — Non-Premixed

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10291, <https://rscf.ru/project/23-79-10291/>

Литература

1. Harman-Thomas J.M., Hughes K.J. and Pourkashanian M. The development of a chemical kinetic mechanism for combustion in supercritical carbon dioxide // Energy 255, 2022.

В.С. Яковлев, студ.; рук. С.К. Осипов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДУТЬЕВОГО АГЕНТА НА ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА, ПОЛУЧАЕМОГО ДЛЯ СЖИГАНИЯ В КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Переход к кислородно-топливным энергетическим комплексам (КТЭК) позволяет уменьшить выбросы CO_2 в энергетике. КТЭК могут сжигать газовое топливо и уголь, но уголь нуждается в предварительной газификации. Выбор наиболее эффективного способа газификации угля для КТЭК представляет актуальную задачу.

В настоящем тезисы изучено влияние состава газифицирующего агента на параметры генераторного газа. Рассмотрены следующие дутьевые агенты: воздух, кислород, пар, уголекислота. Были определены состав, теплота сгорания и температура генераторного газа в зависимости от агента.

В качестве газифицируемого топлива выбран Каахемский уголь, его свойства приведены в [1]. Расчёт параметров генераторного газа произведён по методике [2], модернизированной под условия КТЭК. Во-первых, расход дутьевого агента задаётся через удельные расходы на газификацию (кг агента/кг угля). Во-вторых, учтена уголекислотная конверсия метана. В-третьих, добавлен итерационный расчёт температуры генераторного газа.

Установлено, что парокислородное дутьё позволяет достичь наиболее высокого качества газификации. При оптимальном (по теплоте сгорания) расходе 0,5 кг агента/кг угля с отношением кислорода к пару в агенте 60:40 по массе генераторный газ имеет высокую теплоту сгорания 19,6 МДж/нм³, температуру 584 °C и содержит всего 6% негорючих примесей.

Благодарность

Исследование выполнено в Национальном исследовательском университете МЭИ за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-30037, <https://rscf.ru/project/25-79-30037/>

Литература

1. Митор В.В., Дубровский И.Е., Карасина Э.С. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) под общ. ред. НВ Кузнецова. — 3-е изд., перераб. — 1998.
2. Попов С.К., Ипполитов В.А. Решение задач высокотемпературной теплотехнологии в среде Mathcad: учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 95 с.

И.О. Лапин, студ.; рук. В.О. Киндра, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРАЦИИ В УСТОЙЧИВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Повышение экологической безопасности энергетического сектора является одной из важнейших задач, стоящих перед современным обществом [1]. Сегодня данная проблема особенно актуальна из-за наблюдаемого в мире совершенствования ценовых инструментов углеродного регулирования, направленных на формирование экономических стимулов для промышленных предприятий к снижению выбросов CO_2 в атмосферу. В свете текущих мировых трендов на декарбонизацию и энергосбережение перспективным направлением в области создания устойчивых энергетических систем является развитие инновационных энергетических комплексов, работающих на природном газе [2]. В то же время при планировании структуры энергетической системы необходимо соблюдение баланса между показателями ее энергетической, экологической и экономической эффективности.

В настоящей работе выделены основные технологические классы перспективных энергетических комплексов (ЭК), работающих на природном газе — высокоэффективные, низкоуглеродные и безуглеродные ЭК. Разработан алгоритм многокритериальной оптимизации структуры производства электрической энергии, основанный на последовательном применении таких математических инструментов, как: анализ главных компонент, Парето-оптимизация, метод энтропийного взвешивания и метод упорядочения предпочтений по близости к идеальному решению. Установлено, что при заданных моделью ограничениях доля высокоэффективных ЭК в Парето-оптимальных структурах генерации, как правило, не превышает 40%, низкоуглеродных ЭК — 60%. Кроме того, с увеличением горизонта энергетического планирования доля безуглеродных ЭК в наиболее эффективных структурах генерации возрастает до 51% при вводе генерирующего оборудования в 2031 году и 92% при дате начала функционирования энергосистемы в 2035 году. Предложенная методика позволяет проанализировать изменение оптимальной структуры генерации во времени, указывая на приоритетное направление развития устойчивой энергетики.

Литература

1. **Muniz R.N.** et al. The sustainability concept: A review focusing on energy // Sustainability. — 2023. — Т. 15. — №. 19. — С. 14049.
2. **Ediger V.Š., Berk I.** Future availability of natural gas: Can it support sustainable energy transition? // Resources Policy. — 2023. — Т. 85. — С. 103824.

Секция 37

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Processes and apparatuses of industrial heat engineering

Председатель секции: к.т.н., доцент Горелов Михаил Валентинович

Секретарь секции: к.т.н., доцент Пурдин Михаил Сергеевич

*В.А. Поженько, асп.; О.Е. Прун, ст.преп.;
А.Б. Горяев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ТРУБЧАТЫХ ОРЕБРЁННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ВЛАГОВЫПАДЕНИЕМ

Трубчатые оребрѐнные теплообменники широко применяются в энергетике и процессной промышленности, однако справочные зависимости для коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления часто дают значимые расхождения для различных геометрических параметров и покрытий, особенно при охлаждении влажных газов с конденсацией паров. Показано, что аэродинамическое сопротивление в таких аппаратах может возрастать в 1,6–2 раза [1, 2]. При этом для ламелей используют различные покрытия, но их влияние на скрытый тепловой поток и аэродинамику изучено недостаточно.

Цель работы — разработка экспериментального стенда для измерения теплогидравлических характеристик трубчатых оребрѐнных кассет производства NED в режиме с влаговываждением. Объект исследования — секция теплообменника с двумя сменными кассетами с ламельным оребрением на прямых трубах: с гидрофильной фольгой и с эпоксидным покрытием. Стенд включает открытый воздушный контур (ВК) и закрытый водяной контур (ВдК); Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

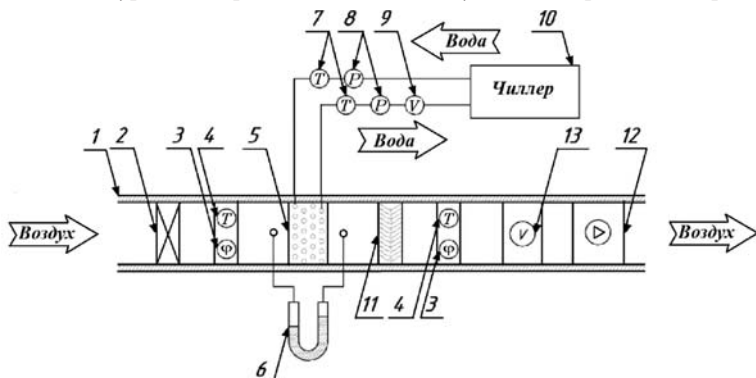


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — Секции ЦК; 2 — решётка-турбулизатор; 3 — датч. RH; 4 — датч. Т (ВК); 5 — испытуемый ТО; 6 — манометр (ВК); 7 — датч. Т (ВдК); 8 — манометр (ВдК); 9 — расходомер (ВдК); 10 — Чиллер; 11 — каплеуловитель; 12 — вентилятор с ПЧ; 13 — расходомер (ВК)

Литература

1. Min J., Webb R.L., Bemisderfer C.H. Long-term hydraulic performance of dehumidifying heat exchangers with and without hydrophilic coatings // HVAC&R Research. 2000. Vol. 6, № 3. P. 257–272.
2. Stignor C.H., Sundén B., Fahlén P., Stensson S. Heat transfer and pressure drop under dry and humid conditions in flat-tube heat exchangers with plain fins // Heat Transfer Engineering. 2010. Vol. 31, № 3. P. 179–192.

А.А. Пилипенко, асп.; рук. А.Б. Гаряев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ЦОД К СИСТЕМЕ ГВС

В ходе работы систем охлаждения ЦОД, необходимых для поддержания заданного температурного режима в помещениях с вычислительным оборудованием, отводимое тепло выбрасывается в окружающую среду, без полезного использования. Предполагается направить его на нужды горячего водоснабжения, для чего, предлагается, использовать холодильные машины в роли теплового насоса.

Для реализации подобного решения предлагаются различные варианты технических схем, представленных на рисунке 1.

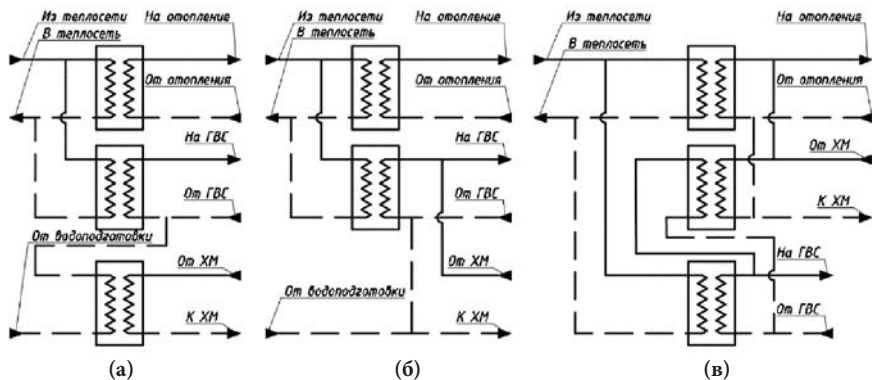


Рис. 1. Варианты схем подключений системы холодоснабжения ЦОД к ГВС

Вариант *а* предполагает нагрев воды до температур 1 ступени ГВС.

Вариант *б* предполагает прямое подключение к ГВС, что позволяет греть воду до температур, нормированных для работы системы ГВС.

Вариант *в* предполагает нагрев воды до температур, необходимых для работы системы отопления, а так же на нужды системы ГВС.

В ходе расчётов подобных вариантов было установлено, что суммарные затраты в условном топливе оптимальны для 3 варианта системы и составили 640 т у.т., тогда как для вариантов 1 и 2 они равны 735 и 690 т у.т. соответственно.

Литература

1. Гаряев А.Б., Яковлев И.В., Клименко А.В. [и др.] Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях — 4-е изд., перераб. и доп. // Москва: НИУ МЭИ, 2021. — 504 с.
2. Авдокунин Н.В., Яковлев И.В. Утилизация сбросной теплоты центров обработки данных в условиях прямого фрикулинга // Вестник МЭИ. 2025. № 4. С. 86–93.

*Р. Магомедова, асп.; Д.А. Кучкин, студ.;
рук. М.С. Пурдин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ОХЛАЖДАЕМОМ РЕБРЕ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

В настоящее время наблюдается рост интереса к быстрому решению задач моделирования физических процессов в реальном времени или ускоренном. Оно может быть применено для получения данных о теплообмене со сложной нестационарной постановкой в аккумуляторах теплоты [1], в грунте [2–4] и т.п. Годы практики показали, что численные методы ограничены вычислительными ресурсами. Трудность заключается в эффективном решении СЛАУ, многомерные задачи решают энергозатратным методом Гаусса-Зейделя. Аналоговые методы позволяют получать результат практически мгновенно с минимальными затратами энергии. Подавляющая доля моделей теплообменных процессов может быть смоделирована по электротепловой аналогии, а модель представлена электрической схемой. На кафедре ТМПУ разработан экспериментальный стенд, содержащий RC-цепи, позволяющий наблюдать аналогию процесса нагрева ребра. Результаты совпадают с аналитическим решением с характерным размером ребра 0,258 м из конструкционной стали с $Bi = 12,1$ и $Fo = 4,342 \cdot 10^{-5}$ на уровне погрешности $0,4^\circ\text{C}$ (см. на рис. 1 аналитические кривые для нескольких координат длины ребра и экспериментальные точки с доверительным интервалом).

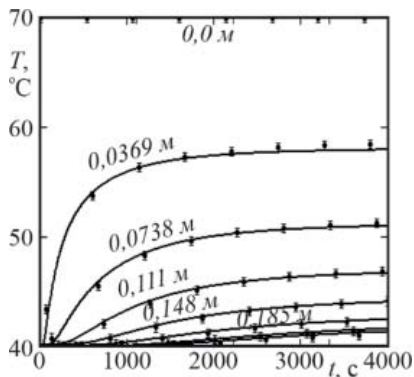


Рис. 1. Изменение температуры ребра

Литература

1. Пурдин М.С., Гаряев А.Б. Исследование тепловых характеристик твердого изолированного цилиндрического аккумулятора теплоты // Вестник ЮГУ. С.: Энергетика. 2023. Т. 23, № 2. С. 73–82.
2. Пурдин М.С., Магомедова Р. Тепловые притоки и потери в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты // XXII Бенардосовские чтения, Иваново, 31 мая 2023 г. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 234–237.
3. Пурдин М.С., Гаряев А.Б. Численное моделирование естественной аккумуляции теплоты в грунте при сезонном промерзании // Промышленная энергетика. 2021. № 7. С. 34–42.
4. Пурдин М.С., Цепляева Е.В. Определение значения коэффициента эффективной температуропроводности грунта в пассивном эксперименте // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 50–57.

Д.А. Вдовин, студ.; рук. М.С. Пурдин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВОКРУГ НАГРЕВАТЕЛЯ С ЗАДАНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

На заполярных и Арктических территориях России затруднительно применение водяного и газового отопления из-за отсутствия инфраструктуры и экстремальных климатических условий. В таких условиях электрическое отопление становится основным технологическим решением. При работе электрических калориферов воздух нагревается неравномерно и может возникать градиент температур и напряжений, на самом ТЭН. Для надежной работы ТЭН необходимо моделировать теплообмен между теплоносителем и нагревательным элементом, что позволит проектировать новые, оптимальные и эффективные аппараты.

Цель работы: разработка модели теплообмена ТЭН.

Были решены задачи аппроксимации зависимости тепловыделения по длине ТЭН по формуле Гаусса и в ряд Фурье [1] и получения распределения энтальпии теплоносителя в электрическом калорифере. Для аппроксимации тепловыделений использованы функция Гаусса

$$q_l(x) = \exp\left(-a\left(\frac{x-b}{\sigma}\right)^2\right) \text{ и ряд Фурье } q_l(x) = \sum_{k=0}^n \left(a_k \cdot \sin(k \cdot \pi \cdot \frac{x-b}{L})\right),$$

где a , b и σ — параметр, подбираемые методом наименьших квадратов, L — длина ТЭН, k — гармоника. Изменение энтальпии вычислено по формулам

$$H_{i+1} = H_i + \Delta X \cdot \tilde{Q}(x),$$

$$\tilde{Q}(x) = \frac{L \cdot q_l(x)}{\int_0^L q_l(x) dx}$$

где $X = x/L$ и $H = h/\Delta h$ — безразмерная координата и энтальпия, h и Δh — энтальпия и ее характерный перепад, Дж/кг, ΔX — шаг сетки.

Литература

1. Пурдин М.С., Пурдина Е.И. Методы инженерных исследований // М.: Издательство МЭИ, 2021. 76 с.

Секция 38
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ
Energy saving and industrial ecology

Председатель секции: к.т.н., с.н.с. Яковлев Игорь Васильевич

Секретарь секции: к.т.н., доцент Пурдин Михаил Сергеевич

В.В. Юзюк, асп.; рук. М.С. Пурдин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОВРЕМЕННЫЙ ФРЕОН ДЛЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Проблема подбора фреона является актуальной задачей при проектировании теплонасосной установки, использующей тепло грунта [1] или других низкопотенциальных источников [2]. При оптимизации существует множество параметров, например, потенциал глобального потепления (ПГП), озоноразрушающий потенциал (ОРП), доступность на рынке и цена, теплотехнические показатели: коэффициент трансформации теплоты (КТТ) μ , степень сжатия в компрессоре ε , удельные плотность газа ρ_g , работа сжатия N , мощность конденсатора Q и т.п.; все важны. В таблице представлены некоторые показатели циклов [3–4] тепловых насосов при температуре в испарителе 0 °С и в конденсаторе 35 °С и КПД компрессора 60%. На рисунке представлена гистограмма отношений величин к их максимальным значениям в таблице. Специально собраны наиболее эффективные и доступные рабочие тела. Применяя R410b или R134a, можно создать установку большей мощности, хотя КТТ для R141b велик. Оптимальным из рассмотренных в данном случае является фреон R134a, т.к. плотность газа всего в 2 раза ниже, чем у R410a, а КТТ выше.

Таблица 1. Характеристики циклов тепловых насосов на различных фреонах

Фреон	μ	ε	Q , кДж/м ³	N , кДж/м ³	ρ_g , кг/м ³	ОРП	ПГП
R410a	4,682	2,905	23620	3961	88,81	0	1370
R141b	5,216	3,636	1521	250,5	5,349	0,1	630
R600a	4,969	2,816	5066	817,6	11,988	0	3
R134a	4,899	3,009	10290	1666	43,42	0	1300

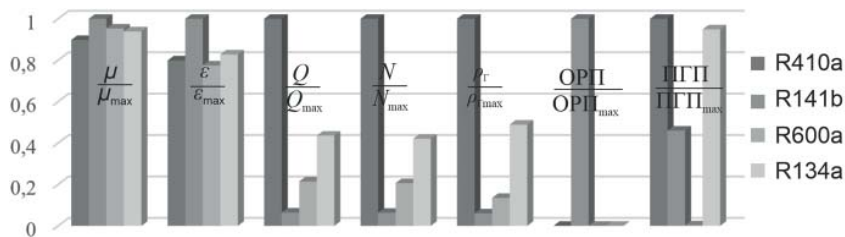


Рис. 1. Относительные параметры циклов тепловых насосов на различных фреонах

Литература

1. Пурдин М.С., Магомедова Р. Тепловые притоки и потери в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты // XXII Бенардосовские чтения, Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 234–237.
2. Purdin M.S. Thermodynamic analysis for definition of low-potential heat sources // Unconventional Resources. 2025. Vol. 5. P. 100126.
3. Свойства и нюансы использования хладагентов. Часть 2 // СОК № 12. 2015.
4. Пурдин М.С., Юзюк В.В. Исследование эффективности двухступенчатого теплового насоса на изобутане // Материалы IV межд. конф. СПТЭ, Москва, 2024. М: МЭИ. С. 431–432.

*Р. Магомедова, асп.; В.В. Юзюк, асп.;
рук. М.С. Пурдин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В природные источники низкопотенциальной теплоты (НПТ) [1] попадают грунт (самый энергоемкий), вода и воздух. При охлаждении верхних 50 м грунта на 5 °С можно получить $8,6 \cdot 10^{22}$ Дж теплоты. Например, общемировая тепловая установленная мощность топливных ТЭЦ оценивается на уровне 13,8 ТВт. При таких темпах потребления теплоты грунта хватит на 198 лет без компенсации из других источников. Методы использования этой теплоты активно исследуются в последнее время [2]. Грунт может выступать аккумулятором теплоты [3], большой объем которой запасен в виде теплоты фазового перехода [4]. Общий объем НПТ техногенных источников оценим сравнением. Доля отопления, от количества теплоты, отпущенной центральным теплоснабжением в России, составляет 40% (482 млн Гкал в 2021 г.) [5]. А объем потребления электроэнергии в 2021 г. — 1090,4 млрд кВт·ч (934,6 млн Гкал) [6]. Большая доля электроэнергии преобразуется в теплоту, поэтому в целом этих и прочих источников достаточно для отопления. Проблемой здесь является малая эффективность отопительных приборов. Существуют отопительные низкопотенциальные устройства: «теплые полы», «теплые стены», «потолочные маты», активная теплозащитная ограждающая конструкция. Они используют поверхности помещений для поддержания температуры, не занимают полезного и максимально расширяют комфортный объем в помещении, а температура теплоносителя близка к комнатной.

Литература

1. **Purdin M.S.** Thermodynamic analysis for definition of low-potential heat sources // Unconventional Resources. 2025. Vol. 5. P. 100126.
2. **Пурдин М.С., Цепляева Е.В.** Определение значения коэффициента эффективной температуропроводности грунта в пассивном эксперименте // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 50–57.
3. **Пурдин М.С., Магомедова Р.** Тепловые притоки и потери в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты // XXII Бенардосовские чтения, Иваново, 2023. Иваново: ИГЭУ. С. 234–237.
4. **Пурдин М.С.** Метод численного моделирования теплообмена в аккумуляторах теплоты с множеством фаз и свободным перемещением фазовых границ // «Энергосбережение теория и практика», Москва. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. С. 77–81.
5. Отчет о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2021 году // РЭА Минэнерго России. 2022.
6. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году // АО «СО ЕЭС». 2022.

И.А. Бобылев., студ.; рук. М.С. Пурдин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ОДИНОЧНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Грунтовые теплообменники (ГТО) — это системы, использующие тепловую энергию окружающей среды, передаваемую [1] и аккумулированную [2] в грунте, для целей отопления, охлаждения и горячего водоснабжения зданий и сооружений. Они являются частью геотермальных систем отопления или охлаждения и считаются экологически чистым и энергоэффективным решением. Проблемой здесь является отсутствие эффективных и корректных методов расчета. Имеются сведения только о численных [3] и численно-аналитических [4] методах или приближенных оценочных методиках проектирования [5].

Рассмотрен случай теплообмена в грунте в г. Раменское, Московской области [1], вокруг ГТО из ПНД труб 32×2 мм и глубиной 50 м с U-образным поворотом на конце, через который прокачивается раствор этиленгликоля с температурой на входе 0 °С, на выходе 1 °С. Для расчета использовано двухмерное осесимметричное аналитическое решение с граничными условиями I, II и III родов, разработанное на кафедре ТМПУ «НИУ «МЭИ», позволяющее получить распределение температуры в грунте за ≈1 секунду. Получено, что один ГТО имеет минимальную мощность 1 560 Вт. 7 теплообменников, объединенных в один комплекс, позволят извлекать более 11 кВт среднегодовой тепловой мощности без потери производительности. Решение получено для установившегося (за многолетние циклы) теплообмена в грунте без учета взаимного влияния теплообменников. Это влияние снижает установившуюся мощность. Для его полного предотвращения, как следует из результатов расчетов, необходимо располагать теплообменники на расстояниях более 100 м.

Литература

1. Пурдин М.С., Цепляева Е.В. Определение значения коэффициента эффективной температуропроводности грунта в пассивном эксперименте // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 50–57.
2. Пурдин М.С. и др. Моделирование установившегося теплообмена в цилиндрическом однофазном аккумуляторе теплоты при колеблющемся граничном условии первого рода // «Энергосбережение теории и практика», Москва. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. С. 82–87.
3. Пурдин М.С., Магомедова Р. Тепловые притоки и потери в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты // XXII Бенардосовские чтения, Иваново, 31 мая 2023 г. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 234–237.
4. Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes // Швеция, Лунд. 1987.
5. Кадцын И.И. Улучшение эксплуатационных и технико-экономических характеристик геотермальных теплотрансформаторов // автореферат диссертации на соиск. уч. ст. к.т.н., ФГБОУ ВО ОГУПС, Омск, 2022, 22 с.

Н.А. Долгомиров, студ.; Р.Е. Цуканов, асп.;
рук. А.Б. Горяев, д.т.н., проф.(НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЛАГОВЫПАДЕНИЯ В РОТОРНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

В холодильный период в традиционных пластинчатых теплообменниках происходит обмерзание, что резко снижает их эффективность. Роторные аппараты, в силу регенеративного принципа работы и вращающегося ротора, потенциально лишены этих недостатков и позволяют рекуперировать не только явную, но и скрытую теплоту. Для анализа работы такого теплообменного аппарата была разработана математическая модель, позволяющая идентифицировать ключевые факторы, влияющие на его производительность. Модель включает в себя уравнение для энтальпии воздушного потока при прохождении через насадку (1) и уравнение описывающее изменение температуры насадки во времени (2).

$$G C p_{\text{в}} (H'_1 - H''_1) = \alpha F \left(\frac{H'_1 + H''_1}{2} - \bar{H}_{\text{н}} \right), \quad (1)$$

$$m C p_{\text{н}} \frac{dt_{\text{н}}}{d\tau} = \frac{\alpha F}{C p_{\text{в}}} \left(\frac{H'_1 + H''_1}{2} - \bar{H}_{\text{н}} \right), \quad (2)$$

На рис.1 представлены результаты расчета, полученные с помощью данной модели. Расчеты показали, что отношение переданной тепловой мощности в теплообменнике с влаговываждением и без составило 1,34. Сопоставление проведено при равных расходах потоков воздуха (5000 кг/ч) и при равных начальных температурах ($t'_1 = 35^\circ\text{C}$; $t'_2 = -15^\circ\text{C}$), относительные влажности равны 70% и 4,5% для влажного и сухого воздуха соответственно.

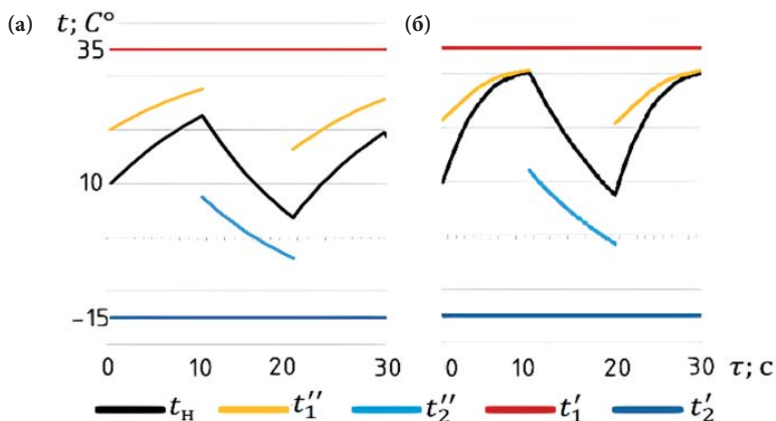


Рис. 1. Изменение температур теплоносителей и насадки в роторном теплообменнике без выпадения влаги (а) и с влаговываждением (б): $t_{\text{н}}$ — температура насадки; t'_1, t''_1 — начальная и конечная температура горячего воздуха; t'_2, t''_2 — начальная и конечная температура холодного воздуха.

Т.А. Кондракова, студ.; рук. А.Б. Гаряев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ОСТЫВАНИЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЗДАНИЯ ПРИ АВАРИЙНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ, УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККУМУЛЯЦИИ

Важным практическим вопросом является определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения. Актуальность данной проблемы подтверждается большим количеством аварий на тепловых сетях и их тяжелыми последствиями.

Принято рассчитывать время остывания здания по методике Соколова [1]. Данная методика имеет допущение — теплосодержание здания вычисляется по температуре внутреннего воздуха. Однако действительное теплосодержание здания меньше. Это связано с тем, что части ограждающих конструкций здания соприкасаются с наружным воздухом. Уточнение значения теплосодержания здания повысит точность вычисления времени остывания здания, соответственно.

Теплосодержание здания рассчитывается следующим образом: внутренние стены и перекрытия, лестничные марши — по внутренней температуре, наружные стены и крыша — по средней температуре ограждающей конструкции, так как при стационарном режиме профиль распределения температур в стенке линейный.

Чтобы не допустить замерзания воды в сетях, средняя температура в здании должна быть не меньше +5°C. Проведены расчеты времени остывания многоквартирного дома типовой серии 1-464, при температурах наружного воздуха -25°C, -15°C, -10°C. при различной мощности внутренних источников тепла. Расчеты проведены с учетом отличия теплосодержания здания и без учета. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов времени остывания здания

t_n	-25°C		-15°C		-10°C	
Q, кВт	Методика Соколова	Уточненный расчет	Методика Соколова	Уточненный расчет	Методика Соколова	Уточненный расчет
0	21,11	15,25	29,13	23,48	36,08	28,86
40	22,74	17,21	32,38	26,27	41,30	36,08
80	24,64	19,15	36,47	31,08	48,41	44,96
120	26,90	21,92	41,82	38,29	58,76	58,27
160	29,64	24,98	49,13	49,08	75,84	74,92

Результаты вычислений значительно отличаются. При аварии на тепловых сетях это существенное время, учитывая которое можно избежать серьезных последствий аварии.

Литература

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети — М.:МЭИ, 2001 — 472 с.

Д.В. Рязанцева, асп.; рук. А.Б. Гаряев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩУЮ КОНСТРУКЦИЮ ЗДАНИЯ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ ФАСАДОМ

Цель работы: разработка математической модели расчёта теплопотерь через ограждающую конструкцию здания с вентилируемым фасадом.

Навесная фасадная вентилируемая конструкция предназначена для защиты тепловой изоляции от влаги. Она состоит из несущей конструкции 1, теплоизоляции 2, воздушной полости 3, облицовки 4 и анкерных конструкций (рис. 1) [1]. На первом этапе в модели анкерные связи между элементами не учитывались.

Модель включает уравнение теплового баланса, в котором принято, что тепловой поток через ограждение и тепловую изоляцию равен тепловому потоку, уходящему через воздушный зазор (1):

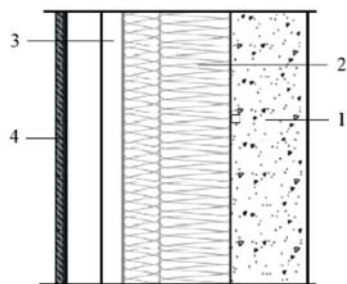


Рис. 1. Составляющие ограждающей конструкции здания с НФС

$$F \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_{\text{зазора}}}} \right) (t_{\text{вн}} - t_{\text{зазора}}) = G c_p (t_{\text{зазора}} - t_{\text{ос}}) \quad (1)$$

В модель входят также уравнение постоянства расхода (2) и уравнение равенства давлений при действии сил плавучести и сил трения (3):

$$G = \rho' \omega' = \rho'' \omega'' = \rho_{\text{ср}} \omega_{\text{ср}} \quad (2)$$

$$\Delta P = (\rho' - \rho'') g H = \xi \frac{H}{d} \frac{\rho_{\text{ср}}^2 \omega_{\text{ср}}^2}{2} + (\rho''^2 \omega''^2 - \rho'^2 \omega'^2) \quad (3)$$

Коэффициент теплоотдачи и коэффициент трения в воздушном зазоре определяются по известным критериальным уравнениям в зависимости от режима течения. В дальнейшем возможен также учёт передачи тепла излучением через воздушный зазор.

С помощью указанной модели можно определить температуру и скорость воздуха, а также тепловой поток, передаваемый через ограждение.

Литература

1. СП 522.1325800.2023 «Системы фасадные навесные вентилируемые». Правила проектирования, производства работ и эксплуатации. Применяется с 06.06.2023.

*М.А. Аскаров, Т.А. Самородова, студ.;
рук. А.Б. Гаряев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ ОТОПЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

Цель данной работы: сравнить два режима отопления индивидуального жилого дома — дежурный и периодического включения. При дежурном режиме в помещении в течение всего отопительного периода поддерживается минимально необходимая температура, если в помещении нет жильцов и требуемое комфортное ее значение, когда они присутствуют. В режиме периодического включения отопление включается только, когда в помещении присутствуют люди.

Принятые допущения: не учитывается масса внутренних стен, перекрытия и крыши, поскольку они малы по сравнению с массой наружных стен, не учитываются потери тепла через перекрытия, т.к. они сравнительно невелики, потери тепла через ограждения в период нагрева и охлаждения здания также малы по сравнению с затратами тепла на прогрев строительных конструкций и не оказывают сильного влияния на расход топлива.

Для одноэтажного дома из кирпича размером 6×9×3 метра с толщиной стенки 0,5 метра и температур дежурной 15°C и комфортной 20°C рассчитаны затраты газообразного топлива на отопление в зависимости от количества приездов жильцов и времени их пребывания в здании (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение расходов топлива дежурного и периодического режимов для Москвы и Архангельска

	Москва		Архангельск	
	дежурное	периодическое	дежурное	периодическое
Средняя температура за отопительный период, °C	-1,7	-1,7	-4,1	-4,1
Длительность отопительного периода, сут.	202	202	245	245
Длительность приезда, сут	2		2	
Количество приездов	29		29	
Расход топлива, кг/с	510	220	690	245
Длительность приезда, сут.	5		5	
Число приездов за период	20		20	
Расход топлива, кг/с	315	195	420	215

Показано, что для рассматриваемых условий гораздо выгоднее периодическое отопление, причем в районах с теплым климатом разница в затратах топлива в указанных режимах снижается.

А.А. Антонов, студ.; И.А. Степанов асп.;
рук. Ч.А. Кадыров, к.т.н., В.С. Глазов, д.т.н. (ТМПУ, Москва)

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ОКОН НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЧЕРЕЗ НАРУЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЯ

В современных условиях энергоэффективность зданий приобретает всё большее значение как с экономической, так и с экологической точки зрения. Считается, что внедрение энергосберегающих окон позволяет существенно снизить тепловые потери непосредственно через остекление световых проёмов и улучшить теплоизоляционные характеристики зданий, повысить уровень звукоизоляции и снизить энергозатраты. Однако замена «старых» окон на новые (энергосберегающие) приводит к увеличению площади оконных откосов, т. к. толщина первых превышает толщину вторых. Поскольку увеличение площади теплообмена приводит к увеличению теплового потока, возникает вопрос: «Не приводит ли такая замена окон к тому, что величина, на которую снижаются тепловые потери через световой проём, будет меньше величины, на которую увеличится тепловой поток через непрозрачную часть ограждения?». Решение данной задачи актуально для зданий старой постройки, толщина наружного ограждения которых значительно превышает толщину многослойных наружных ограждений современных зданий. Более того, доля фронтальной площади, занимаемой световыми проёмами в наружном ограждении в современных зданиях значительно отличается от доли, которую имеют окна в наружном ограждении старых зданий.

В данной работе проводится сравнительный анализ старых окон и энергосберегающих окон в контексте их применения в старых зданиях.

Если отношение изменённого потока через окно к изменённому потоку через непрозрачное ограждение меньше или равно единице, то замена старых окон на современные энергосберегающие нецелесообразна.

$$\frac{\Delta Q_{\text{ок}}}{\Delta Q_{\text{н.огр}}} \leq 1 \text{ или } 1/[1 + \Delta Q_{\text{н.огр}}/\Delta Q_{\text{ок}}] \leq 1/2 \quad (1)$$

где $\Delta Q_{\text{н.огр}}$ — увеличение тепловых потерь через наружное непрозрачное ограждение после замены окон; $\Delta Q_{\text{ок}} = Q_{\text{окн}}^{\text{с}} - Q_{\text{окн}}^{\text{н}}$ величина, на которую снизились тепловые потери через окно при замене.

Выражение 1 может быть представлено в виде:

$$\chi = 2 \cdot \delta_{\text{отк}} \left(\frac{l_{\text{ок}} + h_{\text{ок}}}{l_{\text{ок}} \cdot h_{\text{ок}}} \right) / \left[R_{\text{н.огр}} \left(\frac{R_{\text{н.ок}} - R_{\text{с.ок}}}{R_{\text{н.ок}} \cdot R_{\text{н.ок}}} \right) \right] \quad (2)$$

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0017 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

Секция 39
ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
Industrial heat power engineering systems

Председатель секции: к.т.н., доцент Яворовский Юрий Викторович

Секретарь секции: к.т.н. Жигулина Екатерина Валериевна

*С.В. Полканов, асп., А.Ю. Лихаева, ассистент;
рук. М.В. Лукин, к.т.н., доц. («НИУ МЭИ»)*

О ПРОБЛЕМЕ УЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ В ЗДАНИЯХ С ТРАНЗИТНЫМИ ТРУБОПРОВОДАМИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

При проектировании и эксплуатации современных систем централизованного теплоснабжения большое значение имеют вопросы энергоэффективности и точного измерения передаваемой тепловой энергии. Важным фактором, оказывающим существенное влияние на показатели энергопотребления, являются транзитные трубопроводы тепловых сетей, проходящие внутри зданий. Такие трубопроводы оказывают значительное влияние на температурный режим подвальных помещений, увеличивая трансмиссионные потоки через ограждающие конструкции, включая перекрытие первого этажа и подвала [1]. Приборы учета фиксируют заниженный объем потребленного тепла, поскольку здания дополнительно обогреваются теплом от транзитных линий.

Современные законодательные и нормативные акты, регулирующие порядок коммерческого учета тепловой энергии, не включают положений, учитывающих влияние транзитных трубопроводов на энергопотребление. Отсутствие соответствующих норм вызывает искажение фактического объема потребляемой тепловой энергии и снижает плату для потребителей, чьи объекты имеют транзитные трубопроводы тепловых сетей.

При проектировании систем отопления зданий тепловые потоки транзитных трубопроводов также не учитываются. Учёт этих дополнительных потоков позволит снизить затраты на строительство и эксплуатацию систем отопления, сократив их мощность.

В работе проведена расчетная оценка влияния транзитных трубопроводов тепловых сетей на параметры микроклимата подвальных помещений и на расчетную отопительную нагрузку помещений первого этажа типовых панельных многоквартирных домов.

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023687736 Российская Федерация. Федеральная служба по интеллектуальной собственности: №2023686362; заявлено 01.12.2023; опубликовано 18.12.2023, Бюл. № 12/ Лукин М.В., Соколов И.С., Махновец С.Н. [и др.]; правообладатель ПАО «МОЭК».

*В.С. Лукьянов, аспирант;
рук-ли И.А. Султангузин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
Ю.В. Яворовский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»).*

ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИОННО-ДИФфуЗИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ОЦЕНКОЙ ИНТЕГРАЦИИ С СОЛНЕЧНЫМ ВАКУУМНЫМ ТРУБЧАТЫМ КОЛЛЕКТОРОМ

Абсорбционные холодильные машины (АБХМ), работающие на солнечной энергии, представляют собой экологически безопасную альтернативу традиционным компрессионным системам охлаждения.

В условиях умеренного климата Московского региона, характеризующегося среднегодовой продолжительностью солнечного сияния 1600–1800 часов, уровень инсоляции достаточен для эффективного применения вакуумных трубчатых солнечных коллекторов.

Экспериментальное исследование АБХМ «Морозко-3М», функционирующей по герметичному абсорбционно-диффузионному циклу с использованием аммиака (NH_3) в качестве хладагента, водного раствора аммиака — как абсорбирующего раствора, и водорода (H_2) — в качестве диффузионной среды [1], показало, что при подводе тепловой мощности 91,4 Вт достигается холодильная мощность 51 Вт, что соответствует коэффициенту преобразования (COP) 0,55.

Принцип работы основан на создании разности парциальных давлений между аммиаком и водородом, что обеспечивает самопроизвольную циркуляцию рабочего вещества без механических насосов, определяя высокую надёжность и простоту конструкции [1, 2].

Для реализации автономного режима вместо электронагревателя предложено использование вакуумного трубчатого солнечного коллектора «ЯSolar». Расчётная площадь коллектора, необходимая для обеспечения требуемой тепловой мощности (91,4 Вт) при среднесуточной инсоляции Московской области ($4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{сут}$) с учётом запаса, составляет $0,77 \text{ м}^2$.

Полученные результаты подтверждают техническую возможность автономной солнечной АБХМ и создают базу для разработки экологических холодильных установок малой мощности для бытового применения.

Литература

1. **Соколов, Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. — М. : Энергоиздат, 1981. — 320 с.
2. **Леваев, Д.А.** Ремонт бытовых холодильников : справочник / Д.А. Леваев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Легпромбытиздат, 1989. — 304 с.

М.Ш. Мутаев, асп.; рук. А.В. Рыженков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕР В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Повышение эффективности теплоизоляции в условиях растущих цен на электроэнергию особенно актуально в северных регионах с экстремальными климатическими условиями. Численное моделирование методом конечных разностей позволило рассчитать эффективную теплопроводность [1] и получить профили температур слоя. Результаты свидетельствуют о снижении теплового потока на 17–23% в диапазоне температур от 100 до 300°C за счёт снижения конвективной и увеличения радиационной составляющих теплообмена при использовании вакуумированных полых стеклянных микросфер, по сравнению с газонаполненными. Экономическая целесообразность их применения в составе теплоизоляционных матов определяется величиной годовой экономии энергии, которая вычисляется по формуле (1):

$$E = (q_{\text{air}} - q_{\text{vac}}) \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

где q_{air} и q_{vac} — плотности тепловых потоков (Вт/м²) при наличии воздуха и вакуума соответственно, S — площадь теплоизолированной поверхности (м²), τ — время работы за год (ч).

Для промышленного объекта с $S = 1000$ м², с учётом средней стоимости электроэнергии 3000 рублей за МВт·ч и $\tau = 1000$ ч выполнена экономическая оценка (таблица 1).

Таблица 1. Экономия и срок окупаемости при различных температурах верхней границы теплоизоляционного мата

$t, ^\circ\text{C}$	$q_{\text{air}}, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{vac}}, \text{Вт/м}^2$	$E, \text{МВт ч}$	$\Delta, \text{тыс. руб.}$	$ROI, \text{лет}$
100	163,3	135,6	27,7	83,1	3,6
200	554,9	435,2	119,7	359,1	0,84 (10 мес.)
300	1076,0	829,2	246,8	740,4	0,41 (5 мес.)

Анализ данных таблицы 1 показывает, что экономия увеличивается в 8,9 раз. Дальнейшее совершенствование состава теплоизоляционных матов должно проводиться с учётом технико-экономической целесообразности при варьировании толщины слоя, климатических условий, температуры поверхности.

Литература

1. **Astrath, N.G.C.** Time-resolved thermal measurements of the thermo-optical properties of glasses at low temperature down to 20 K / N.G.C. Astrath et al // Physical Review B. — 2005. — Т. 71, № 21. — Арт. № 214202.

*Д.А. Абрамова, асп. (НИУ МЭИ);
рук. А.В. Рыженков, д.т.н., проф. (НИУ МЭИ)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

В системах теплоснабжения теплообменные аппараты обеспечивают передачу тепла от сетевой воды к контурам отопления и ГВС, наибольшее распространение получили кожухотрубные и пластинчатые теплообменники. Кожухотрубные ТО прочны и устойчивы к тяжёлым условиям, но громоздки и менее эффективны, тогда как пластинчатые компактны, обладают высоким коэффициентом теплопередачи и удобны в обслуживании, однако более чувствительны к качеству теплоносителя и режимам эксплуатации. В данной работе рассмотрены именно пластинчатые теплообменные аппараты.

Выявлено, что наиболее частыми причинами выхода из строя пластинчатого ТОА являются термобарьерные отложения на пластинах, а также коррозионные повреждения пластин [1]. Одним из перспективных направлений представляется создание защитных покрытий на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ). Такие покрытия наносятся непосредственно на поверхность пластин и формируют барьерный слой, который предотвращает как термобарьерные отложения, так и коррозию.

В работе представлены результаты эксперимента по нанесению защитной плёнки на основе октадециламина (ОДА). Для интенсификации взаимодействия ПАВ с металлом была применена лазерная абляция поверхности пластин, которая создала контролируемый микрорельеф, увеличив площадь контакта и количество активных центров адсорбции. Это обеспечило более равномерное распределение молекул ОДА и формирование многослойного защитного покрытия с высокой адгезией. Гидрофобность обработанной поверхности была количественно оценена измерением краевых углов смачивания.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что комбинированное применение лазерной обработки и ПАВ-модификации привело к снижению скорости образования отложений на поверхности пластин, уменьшению интенсивности коррозионных процессов и сокращению гидравлических потерь в каналах теплообменника. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного подхода и перспективность его практического применения для повышения надёжности и энергоэффективности ПТО.

Литература

1. **Галковский, В.А.** Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности / В.А. Галковский, М.В. Чупова // Наукоедение, 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 8–11.

Секция 40
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ
И ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
Electrochemical and hydrogen energy

Председатель секции: д.т.н., профессор Нефедкин Сергей Иванович

Секретарь секции: Исаев Ярослав Владимирович

З. Пезешки, А.М. Вересоцкая, студ.;
рук. И.А. Султангузин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА В АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Водород — это возобновляемый источник энергии, который может заменить ископаемое топливо, такое как нефть и газ. Он рассматривается как один из ключевых энергоносителей будущего, способный сделать энергетику и промышленность чище, заменив ископаемое топливо. Особый интерес представляют способы его получения, в первую очередь выработка водорода с использованием солнечной энергии, что позволяет существенно снизить выбросы парниковых газов и повысить энергетическую независимость автономных объектов.

Автономные фотоэлектрические системы с производством водорода на базе электролиза воды рассматриваются как перспективное решение для энергообеспечения удалённых потребителей, сезонного аккумулирования энергии и повышения эффективности использования ВИЭ. Однако высокая изменчивость солнечной радиации, непостоянство электрической нагрузки и наличие множества взаимосвязанных подсистем (фотоэлектрический генератор, электролизёр, система подготовки, хранения и использования водорода) требуют строгого анализа для обеспечения надёжности и эффективности работы такой установки.

В этих условиях разработка математической модели установки производства водорода в автономной фотоэлектрической системе становится необходимым инструментом для проектирования и оптимизации. Такая модель позволяет описать энергетические и материальные потоки, установить взаимосвязь между климатическими условиями, режимами работы оборудования и выходом водорода, а также оценить влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на технико-экономические показатели системы.

Литература

1. **Пезешки, З. и др.** РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТ ГИБРИДНОГО АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОКМПЛЕКСА С ВОДОРОДНЫМ ЦИКЛОМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ // в 7-й Международной молодежной конференции IEEE 2025 по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE), Москва, Россия, 2025, С. 1–5, DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970836>
2. **Пезешки, З., и др.** РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЭЦ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ ДЛЯ ВЫТОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ // Энергетические системы, 2024, Том 9, № 2, С. 61–72, DOI: <https://doi.org/10.34031/es.2024.2.006>

*С.А. Комаров, студент;
рук. С.Е. Смирнов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ГАРНИТУРЫ

Литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы являются основными источниками питания для современных портативных устройств, поскольку превосходят по энергетическим параметрам другие электрохимические системы. Настоящая работа посвящена созданию аккумуляторной батареи для беспроводной гарнитуры на основе электрохимической системы $\text{LiC}_6\text{-LiCo}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_2$. В экспериментальной части проведено сравнительные испытания двух литий-ионных аккумуляторов (фирмы-изготовители -Soshine, LitoKala, номинальная ёмкость 700 мА·ч) с оценкой их реальной ёмкости в зависимости от количества циклов заряда-разряда и величины тока.

Электрохимические испытания аккумуляторов проводили на многоканальном потенциостате — гальваностате Элинс Р-20Х8 в автоматическом режиме по заранее записанной в его память программе. Испытания начинали с малых токов заряда-разряда (0,2С), при этом для каждого режима выполняется по 5 циклов. Варьировали следующие токовые режимы: 0,2–0,2С, 0,5–0,5С, 1–1С, 1,5–1,5С и 2–2С. Особое внимание уделялось поведению образцов при максимальных токах, поскольку в последнее время ведутся активные дискуссии о методах быстрой зарядки и их влиянии на аккумуляторы. Установлено, что оба аккумулятора являются достойным выбором для использования их в беспроводной гарнитуре, удовлетворяющим таким требованиям, как стабильность в работе, возможность заряда большими токами (отличающимися в несколько раз от номинальных), отсутствие существенного снижения ёмкости при циклировании. Начальная ёмкость аккумулятора Soshine больше номинальной на 7%, а её падение за 50 циклов составляет 10,5%. У аккумулятора LitoKala начальная ёмкость соответствует номинальной, которая в течении 50 циклов уменьшается на 8%. Оба аккумулятора находятся в одном ценовом диапазоне: для России это 250–700р для LitoKala и 400–800р для Soshine, Если всё же требуется сделать выбор, то лучше использовать LitoKala, т.к. за счёт более устойчивого циклования его можно считать равным по ёмкости аналогу; так же на Российском рынке он более распространён, и если для устройства требуется не один экземпляр, то даже небольшая разница в 100–200р может оказаться существенной.

Проведенные испытания и все необходимые расчеты легли в основу разработки литиевого аккумулятора для беспроводной гарнитуры, удельная энергия которого составила 238 Втч/кг.

В.В. Кулешов, студ.;
рук. М.А. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ ВОДЫ

Моделирование газообразования при электролизе воды осложняется высокой неопределённостью, обусловленной погрешностями измерительного оборудования, неполной наблюдаемостью параметров электролита во всём объёме и влиянием процессов, не поддающихся детерминированному описанию с требуемой точностью (включая молекулярно-кинетические флуктуации). В результате строго детерминированные модели нередко оказываются трудоёмкими и ограниченно воспроизводимыми.

Цель работы — обосновать и продемонстрировать применимость стохастического подхода к описанию электролизного газообразования, в котором процесс представляется суммой детерминированной и случайной составляющих.

Предлагается модель вида, параметры которой идентифицируются по экспериментальным данным. На основании теоретических соотношений и экспериментальных наблюдений принимается гипотеза о близости распределений отклонений к нормальному: размеры пузырьков и их количество флуктуируют вокруг среднего значения, а вероятность больших отклонений убывает. Критерии согласия и анализ остатков используются для проверки нормальности и стационарности, дисперсия и характер корреляций оцениваются статистически.

Включение стохастической составляющей позволяет воспроизводить наблюдаемую вариативность параметров газообразования без существенного усложнения детерминированной части, улучшает согласование «модель — эксперимент» и обеспечивает формализованный учёт неопределённостей измерений и среды.

Стохастический анализ является эффективным инструментом для моделирования газообразования при электролизе воды, повышая предсказательную способность моделей и создавая основу для дальнейшей параметрической оптимизации режимов и конструктивных решений электролизёров.

Литература

1. **H.M.S. Wedershoven, R.M. de Jonge, C.W.M.P. Sillen and S.J.D. van Stralen.** Behavior of oxygen bubbles during alkaline water electrolysis. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1982. No. 8 pp. 1239–1243.
2. **Zhang, D., & Zeng, K.** Evaluating the Behavior of Electrolytic Gas Bubbles and Their Effect on the Cell Voltage in Alkaline Water Electrolysis. // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2012. No. 42 pp. 13825–13832.

С.С. Щербакова

рук. С.В. Тютрина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРОЛИТ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАГНИЕВОЙ СОЛИ

Выбор электролита для работы магний-ионного аккумулятора имеет важное значение. Соль электролита должна растворяться в органическом растворителе, обеспечивать обратимое осаждение / растворение Mg^{2+} и иметь высокую стойкость к окислению и восстановлению [1]. Учитывая, что металлический магний в аккумуляторах легко пассивирует и разлагается, то выбор растворителя для электролита весьма актуален. В качестве комплексной соли было взято нами предлагается соединение, в состав которой входит тетракоординированный бор, лимонная кислота и ионы магния во внешней сфере. В результате проведенных исследований в качестве растворителя дал наилучшие результаты диэтиловый эфир. Растворенная в диэтиловом эфире комплексная соль за счет сильной сольватирующей способности, координации электронодонорных эфирных групп и высокой диэлектрической проницаемости максимально стабилизировала магний на аноде. Было предположено [2], что лиганды непосредственно влияют на характеристики работы магний-ионного аккумулятора, и демонстрируют большие различия в кулоновской эффективности из-за влияния структурных свойств растворителей. В области концентраций 0,01 моль/л — 0,25 моль/л именно в диэтиловом эфире предложенная нами комплексная соль в качестве электролита показывает высокую ионную проводимость в районе 6,82 мкс/см. Ионная проводимость дицитратобората магния находится в диапазоне $1,74 \times 10^{-4}$ С/см⁻¹, стабильность окисления анода улучшается почти на 1 В по сравнению с $Mg [B (HFIP)_4]_2$ /диэтиловый эфир, уменьшается избыточный потенциал осаждения Mg и увеличивается производительность обратимого процесса осаждения/растворения Mg. Предложенный нами электролит может быть использован для магний-ионного аккумулятора, имеет хорошую химическую стабильность, ионную проводимость, обладает сольватирующей способностью и широким электрохимическим окном.

Литература

1. **Шраер С.Д., Лучинин Н.Д., Трусов И.А., Аксенов Д.А.** Разработка материалов для положительного электрода на основе полианиона ванадия для высоковольтных натриевых аккумуляторов // *Nat. Commun.* 2022. № 13. С. 31768–31774. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31768-5>
2. **K. Jayalakshmi Ismayil Jonathan Monteiro** Investigating the properties of hydroxy propyl methyl cellulose based magnesium ion-conducting solid polymer electrolytes for primary battery applications // *Journal of Energy Storage.* 2024. V. 89. С. 3456–3462. <https://doi.org/10.1016/j>

*Н.С. Городничин, студ.; В. Полякова, студ.;
рук. М.А. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ, КАТАЛИТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ) активно внедряются в транспорт и энергетику благодаря высокой эффективности и экологичности. Их эксплуатационные показатели критически зависят от свойств мембраны, состава каталитических слоёв и параметров подачи реагентов (температура, влажность, давление), определяющих терморегулирование, увлажнение мембраны и процессы массопереноса [1].

Цель работы — повысить эффективность и ресурс ПОМТЭ за счёт обоснованного выбора мембранных материалов и оптимизации каталитических композиций с учётом режимов подачи газов. Используется сочетание математического моделирования и эксперимента для отдельной оценки активационных, омических и диффузионных потерь. Анализируются: мембраны в составе мембранно-электродных блоков, микроструктура и активность каталитических слоёв, распределение потоков и воды в газораспределительных каналах и газодиффузионных слоях, влияние температуры, влажности, давления и стехиометрии на поляризационные характеристики.

Экспериментальная часть включает изготовление мембранно-электродных блоков и испытания на тестовой станции HSFC-CTS500 с регистрацией поляризационных кривых. Показано, что производительность ограничивается кинетикой катодной реакции восстановления кислорода и транспортом воды. Оптимальные каталитические композиции достигаются подбором соотношения «иономер/углерод/активная фаза» и регулированием пористости, что стабилизирует трёхфазную границу и снижает диффузионные потери при высоких плотностях тока.

Умеренные избыточные давления и согласованная стехиометрия улучшают контакт газов с каталитическим слоем.

Комплексная оптимизация мембраны, газодиффузионных слоёв и каталитических композиций при рациональном выборе температуры, влажности и давления снижает суммарные поляризационные потери и повышает удельную мощность и ресурс топливных элементов.

Литература

1. С.И. Нефедкин, М.А. Климова, А.В. Иваненко, В.И. Павлов, С.В. Панов, С.В. Шубенков, А.В. Рябухин. Разработка водород-воздушных топливных элементов с открытым катодом для энергосистемы с высокими удельными характеристиками. Электрохимия, 2022, том 58, № 2, с. 1–13.

*М.А. Бешкарев, аспирант, Д.В. Пяткин, студент;
рук. С.Е. Смирнов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТОДНОГО ПРОЦЕССА ЛИТИЕВОГО АККУМУЛЯТОРА

Катод аккумулятора представляет собой многокомпонентный композиционный материал, в котором размер отдельных фаз колеблется от сотых долей до нескольких мкм. Свойства его существенно зависят от размера фаз отдельных компонентов, т.к. процессы, определяющие свойства композиционных материалов, протекают по границам раздела фаз. Как известно, дисперсность и активная поверхность частиц, составляющих катод, существенным образом влияют на его электрохимические характеристики. Поэтому в зависимости от характеристик аккумулятора, его конструкции и технологии формирования катодной массы должны выбираться оптимальный размер частиц, их распределение и активная поверхность. В этой связи чрезвычайно актуальным является вопрос о макрокинетической модели катодов, которая позволяет установить взаимосвязь их структурных и электрохимических параметров. Для моделирования данной системы можно применить модель вложенных шаров, в которой твердая фаза электрода представляется в виде набора зерен сферической формы, причем размеры всех зерен принимаются одинаковыми, а расположение — упорядоченным. Таким образом, мы получаем систему, в которой распределение характеристик происходит по 2-м координатным осям, а также и по времени. Этими координатами являются толщина самого катода и радиус зерна. Для решения данной задачи необходимо составить систему уравнений, описывающих процессы переноса как в межзерновом пространстве, так и в зернах, и решить их совместно. Известно, что в нашем случае перенос ионов лития будет происходить под воздействием, как диффузии, так и миграции, таким образом мы получаем систему из 4 уравнений диффузии и миграции по электролиту и, соответственно, те же уравнения, но описывающие эти процессы в зерне. Был рассмотрен изопотенциальный режим работы электрода, когда распределение потенциала по времени можно считать неизменным. Данную задачу решали численно, методом конечных разностей, задавая для решения разностную схему. Для решения по этой схеме выбран четырехточечный шаблон (точки: $i-1, j$; i, j ; $i+1, j$; $i, j+1$), где по j изменяется время, а по i — глубина проникновения. Для каждого узла этой сетки определены значения концентрации и потенциала. В результате расчетов получены зависимости габаритного тока электрода от времени при постоянном потенциале при различных размерах элементарного зерна. Характер этих кривых практически одинаков, но значение времени, при котором ток становится равным нулю, существенно отличается. Зависимость электрической емкости электрода от размера зерна: она носит экстремальный характер.

А.Ю. Свеженцева, асп.;
рук. Д.В. Блинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», ОИВТ РАН)

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Металлогидридные (МН) электроды активно используются в химических источниках энергии, занимающих важное место в системе перехода к альтернативной водородной энергетике. Совершенствование технологий изготовления электродов представляет собой перспективную стратегию повышения характеристик Ni-МН-аккумуляторов [1].

В данном исследовании были изготовлены электроды на основе сплавов $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$, $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$, $\text{LaNi}_{4.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Al}_{0.2}$ и $\text{LaNi}_{4.4}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ [2]. Исследование было сосредоточено на сравнении эффективности использования карбонильного никелевого порошка и его пропорциональной смеси с медным порошком в качестве токопроводящих добавок. Многокомпонентные сплавы МН были приготовлены в электродуговой печи в атмосфере аргона. Слитки сплава измельчали в агатовой ступке до размера частиц 40–60 мкм. Одну часть порошков смешивали с карбонильным никелем в соотношении 1:4, а другую — с карбонильным никелем и медью в соотношении 1:2:2. Таблетки-электроды диаметром 10 мм и толщиной около 1 мм изготавливали методом холодного прессования под давлением 25 МПа в течение 3 мин. Затем изготовленные таблетки прессовали между двумя пластинами из пеноникеля, соединенными с токосъемником. После этого восемь изготовленных электродов помещали в электрохимические ячейки для дальнейших испытаний.

Результаты исследования демонстрируют значительное влияние на циклическую стабильность добавки к МН-электроду Cu в качестве проводящего связующего. Этот эффект объясняется более высокой механической стабильностью полученных электродов. Однако для образцов с добавлением Cu наблюдалась тенденция к снижению максимальной разрядной емкости и емкости при более высоких плотностях тока.

Литература

1. Volodin A.A., Lapshin A.N., Yakushin I.O., Tarasov B.P. Advanced Materials for Metal Hydride Power Sources // High Energy Chem. 2023. V. 57. P. S370–S374.
2. Kazakov, A.N., et al., Hydrogen storage and electrochemical properties of annealed low-Co AB5 type intermetallic compounds. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. 46(25): P. 13622–13631.

В.Д. Михневич, асп.;
рук. С.И. Нефедкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ

Биполярная пластина (БП) является одним из ключевых компонентов топливного элемента с протонообменной мембраной (ПОМ ТЭ). Она выполняет функции токосъёма, электрического соединения соседних ячеек, распределения реакционных газов по активной поверхности электродов, отвода продуктов реакции (воды) и тепла и механической поддержки мембранно-электродного блока [1]. Поэтому качество проектирования и изготовления БП прямо определяет энергетические и ресурсные характеристики стека ПОМ ТЭ.

Геометрия и размеры каналов БП определяет массоперенос в газодиффузионных и каталитических слоях. Изменение ширины каналов и межканального шага влияет на доступность кислорода в катодной области, на распределение локальной плотности тока и величину концентрационных и омических потерь.

Типовые размеры каналов БП современных коммерческих ТЭ составляют величину порядка 1 мм, при этом для повышения удельной мощности и компактности устройств активно исследуются более узкие каналы.

Мировая практика коммерческих решений демонстрирует приоритет металлических БП (прежде всего на базе титана и коррозионностойких сталей) как более технологичных и долговечных по сравнению с графитными. В отечественной практике масштабируемая технология изготовления металлических БП с узкими каналами пока не отработана, что ограничивает развитие высокоэффективных ПОМ ТЭ.

В рамках работы выполнена отработка метода лазерной обработки поверхности металла для изготовления БП. Лазерное воздействие позволяет формировать каналы малой ширины с высокой точностью (до десятков микрон). Проведены исследования по обработке титана, стали и алюминия. Получены демонстрационные каналы шириной порядка 1 мм с устойчиво воспроизводимым поперечным сечением. Лазерный подход рассматривается как перспективная основа для создания отечественной масштабируемой технологии металлических БП, соответствующей современным требованиям к структуре БП.

Литература

1. **Нефедкин С.И.** Физико-химические методы исследований в технологиях электрохимической энергетики: учебник / С.И. Нефедкин. — М.: Издательство МЭИ, 2024. — 460 с. ISBN 978-5-7046-2965-8.

Н.А. Репетий, студ.;
рук. Д.В. Блинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», ОИВТ РАН, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ

Для реализации национального потенциала водорода как стратегического энергоресурса и построения экономически самодостаточной, конкурентоспособной и экологически ответственной водородной отрасли в Российской Федерации необходима системная государственная политика, основанная на взаимосвязанном применении многих аспектов, изложенных в Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года, Концепции развития водородной энергетики на долгосрочный период до 2035 года, Комплексной программе развития низкоуглеродной водородной энергетики в РФ, Технологической стратегии развития водородной энергетики в РФ до 2035 года. Одной из ключевых задач является создание безопасной и эффективной инфраструктуры для транспортировки и потребления водорода и энергетических смесей на его основе, а также развитие отечественных низкоуглеродных технологий производства, хранения и очистки водорода.

Металлогидридная технология хранения и очистки водорода обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными системами хранения, однако основным препятствием на пути внедрения металлогидридных систем твердофазного аккумулирования водорода является недостаточная эффективность тепло- и массопереноса [1]. Скорость отвода тепла в процессе сорбции водорода может быть повышена за счёт организации псевдоожигенного слоя металлогидридной заправки сплава, т.к. происходит эффективное перемешивание твердых частиц [2].

В данной работе была исследована возможность организации псевдоожигенного слоя в металлогидридном реакторе хранения и очистки водорода. Определена возможность применения метода и исследованы процессы псевдоожигения с целью интенсификации теплообмена в металлогидридном реакторе. Рассчитаны параметры кипящего слоя для металлогидридного реактора проточного типа очистки. Показано, что с ростом расхода смеси растёт коэффициент теплоотдачи от частицы к газу. Определены границы применимости псевдоожигения для работы в составе автономных систем энергообеспечения.

Литература

1. Tacettin Disli, Sera Ayten Çetinkaya, Mehmet Akif Ezan, C. Ozgur Colpan, Numerical investigations on the absorption of a metal hydride hydrogen storage tank based on various thermal management strategies. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 51, Part D, (2024), P. 504–522.
2. Hui Wang, Ajay K. Prasad, Suresh G. Advani Accelerating hydrogen absorption in a metal hydride storage tank by physical mixing. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, I. 21, (2014), P. 11035–11046.

Я.А. Мельников, студ.;
рук. Т.Л. Кулова, д.х.н. (ИФХЭ РАН, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФТОРВАНАДОФОСФАТА НАТРИЯ

Натрий-ионные аккумуляторы являются перспективным направлением в области перезаряжаемых источников тока с неводными электролитами. Катодный материал на основе фторванадофосфата натрия ($\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{O}_2\text{F}$, NVPF) характеризуется высоким напряжением разряда и стабильностью при циклировании. Для повышения электронной проводимости NVPF был синтезирован композит NVPF с углеродными нанотрубками (NVPF@CNT) гидротермальным синтезом из водного раствора, содержащего 0.02 моль H_3PO_4 , 0.03 моль $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$, 0.02 моль NH_2VO_4 и 0.04 моль NaF, с добавлением 0.025 г углеродных нанотрубок. Синтез проводился в герметичном автоклаве из нержавеющей стали при температуре 180 °C в течение 6 часов. Электроды для электрохимических исследований были изготовлены по стандартной намазной технологии. Катодная масса содержала 80% NVPF@CNT, 10% сажи и 10% поливинилиденфторида, растворённого в N-метилпирролидоне. Сборку трехэлектродных электрохимических ячеек проводили в герметичном боксе с атмосферой сухого аргона (содержание воды и кислорода в боксе не превышало 1 ppm). В качестве электролита использовали 1 M NaClO_4 в ЭК-ПК (1:1, об.)

Циклические вольтамперограммы (ЦВА) NVPOF@CNT, зарегистрированные при скорости развёртки потенциала 0.1 мВ/с, показали, что на катодной ветви ЦВА регистрируются 2 чётких пика, отражающих процесс внедрения натрия в NVPOF@CNT. На анодной ветви ЦВА регистрируются ответные пики, отражающие экстракцию из NVPOF@CNT. Результаты гальваностатического циклирования NVPOF@CNT показали, что на заряд-разрядных кривых регистрируются по две чётких зарядных и две чётких разрядных площадки. Средний разрядный потенциал NVPOF@CNT составил около 3.85 В. Разрядная ёмкость при плотности тока 10 мА/г составила около 107 мАч/г, что составляет около 81% от теоретической ёмкости. Длительное циклирование NVPOF@CNT при плотности тока 100 мА/г показало, что деградация составила около 0.2% за цикл.

Литература

1. А.М. Скундин, Т.Л. Кулова, А.Б. Ярославцев. “Натрий-ионные аккумуляторы (обзор)”.

*Я.В. Исаев, В.А. Зайцев,
рук. С.И. Нефедкин, д.т.н., проф., (НИУ МЭИ)*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДОРОДНОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВИЭ

В России большая часть территорий не охвачена централизованным энергоснабжением. На таких территориях энергоснабжение осуществляется автономными системами энергоснабжения (АСЭ), использующими привозное ископаемое топливо [1].

Завоз топлива для таких систем является дорогостоящей и трудоёмкой задачей [2], что в итоге сильно повышает тарифы на производимую энергию, особенно в сравнении с районами с централизованным энергоснабжением [3].

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), в свою очередь, характеризуются переменной динамикой выработки энергии, которая отличается от графиков нагрузки потребителей. Это требует внедрения систем накопления энергии для компенсации разницы между выработкой ВИЭ и текущим потреблением.

В качестве способа накопления рассматривается водородное накопление энергии (ВНЭ) — преобразование избытка вырабатываемой энергии в водород, что вкупе с использованием ВИЭ, позволяет отказаться от использования привозного топлива, тем самым снизить конечную стоимость энергии.

Расчёт АСЭ, использующей ВИЭ и ВНЭ, является сложной задачей, требующей учёта множества факторов. Была разработана математическая модель водородного хранилища энергии. Модель описывает значения давления и температуры водорода в хранилище, в зависимости от его расхода и температуры окружающей среды. Это позволяет определить количество ресиверов, необходимых для хранения водорода в годовом цикле функционирования автономной системы.

Литература

1. **Нефёдкин СИ.** Автономные энергетические установки и системы: учебное пособие. Москва: Издательство МЭИ; 2018. 220 с.
2. **Nefedkin SI, Barsukov AO, Mozgova MI, Shichkov MS, Klimova MA.** Autonomous energy supply based on the wind-energy complex and hydrogen energy storage. *Al'ternativnaâ énergetika i ékologíâ*. 29 июль 2019 г.;(16–18):12–26.
3. **Попель ОС.** Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике. Рос хим ж (Ж Рос хим об-ва им ДИ Менделеева). 2008 г.; 6:95–106.

Д.В. Белякова, студ.; рук. Т.П. Савчук, к.т.н. (МИЭТ, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННОГО В ЭЛЕКТРОЛИТАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ

Разработка экологически чистых технологий производства водорода приобретает все большее значение для удовлетворения растущего спроса на энергию из устойчивых и экологически приемлемых ресурсов. За последние несколько десятилетий были изучены альтернативные методы расщепления воды для получения экологически чистого водорода с помощью фотоэлектрокатализа (ФЭК), но их потенциал остается неиспользованным из-за высокой стоимости производства водорода [1]. Уменьшить себестоимость производства можно, за счёт применения наноматериалов, в частности наноструктур оксида титана в качестве фотоанода [2].

Массивы (НТАОТ), полученные анодным окислением в растворах электролитов на основе органических растворителей, характеризуются высокой удельной площадью поверхности, что является одной из ключевых характеристик фотоанодов. Однако, использование органических растворителей приводит к формированию дефектов в виде остаточного углерода. На данный момент управление количеством остаточного углерода затруднено из-за недостатка информации о влиянии технологических параметров анодного процесса.

В настоящей работе проводилось сравнение фотоанодов — массивов НТАОТ, полученных в различных растворах электролитов на основе двух органических растворителей: этиленгликоля (ЭГ) и полиэтиленгликоля (ПЭГ). Фазовый и химический состав образцов исследовались методами комбинационного рассеяния света, инфракрасной спектроскопии, рентгеновской энергодисперсионной и флуоресцентной спектроскопии и рентгенофазового анализа. Оптические свойства исследовались методом диффузного рассеяния света. Фотоактивность образцов исследовалась методом спектроскопии фототока при освещении светом различного спектрального состава. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей разработки высокоэффективных ФЭК.

Литература

1. **Pitchaimuthu S. et al.** Solar hydrogen fuel generation from wastewater—beyond photoelectrochemical water splitting: a perspective // *Energies*. — 2022. — Т. 15. — №. 19. — С. 7399.
2. **Dhiman V. et al.** Nanomaterials for photo-electrochemical water splitting: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2025. — Т. 32. — №. 22. — С. 13299–13312.

*В.Е. Елецких, асп., Романов М.С.;
рук. С.И. Нефедкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ БИПОЛЯРНОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

Биполярная пластина (БП) — компонент топливного элемента с протонообменной мембраной (ПОМ ТЭ), выполняющий конструктивные функции, обеспечивающий токо- и массоперенос [1]. Актуальной задачей является снижение потерь напряжения при прохождении тока через батареи топливных элементов (БТЭ), увеличение коррозионной устойчивости, а также устойчивости к механическим нагрузкам.

Графит исходя из своей коррозионной устойчивости является приемлемым материалом для массового производства БП для стационарных энергоустановок. Однако для использования в транспортных и мобильных приложениях необходимы более легкие БП. Основными материалами в данном случае выступают титан и алюминий.

Ряд недостатков, таких как крайне низкая коррозионная устойчивость алюминия в кислой среде, высокое сопротивление межфазного контакта титана, не позволяет напрямую использовать эти металлы. Поэтому необходимы покрытия, которые минимизируют эти недостатки.

Современные исследования сосредоточены на создании БП с ключевыми параметрами поверхностного контактного сопротивления (ICR) не более 10 мОм·см² при усилии сжатия 150 Н/см² и тока коррозии 1 мкА/см² в среде топливного элемента. Для обеспечения таких параметров разрабатываются покрытия на основе нитридов титана, нитридов хрома, азотирования.

В рамках работы выполнен синтез защитных покрытий на основе CrN и азотирование биполярных пластин из титана [2]. Однако важно продолжить исследования с целью повышения ключевых характеристик БП, определения динамики их изменений в ходе длительных испытаний в модельных коррозионных средах. Также важным является испытание покрытий БП ПОМ ТЭ, нанесенных на поверхность уже профилированных пластин.

Литература

1. **Нефедкин С.И.** Физико-химические методы исследований в технологиях электрохимической энергетики: учебник / С.И. Нефедкин. — М.: Издательство МЭИ, 2024. — 460 с. ISBN 978-5-7046-2965-8.
2. Разработка магнетронных защитных покрытий нитридов и карбидов хрома на титановых биполярных пластинах топливного элемента с протонообменной мембраной / С.И. Нефедкин, Г.В. Качалин, В.Е. Елецких [и др.] // Электрохимия. — 2025. — Т. 61, № 8. — С. 367–379. — DOI 10.7868/S3034618525080028. — EDN WZXHZD.

Секция 41
ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ
Economics of energy

Председатель секции: к.э.н., доцент Мусаева Диана Эркиновна

Секретарь секции: к.э.н., доцент Овчинникова Юлия Александровна

Ю.В. Неганова, студ.; рук. Е.И. Рукина, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ САРЕХ ГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Актуальность темы заключается в глубоких структурных изменениях электроэнергетики, которые связаны с глобальным энергопереходом. Для генерирующих компаний это обусловлено одновременным выводом из эксплуатации, устаревших активов, инвестиций в ВИЭ и развития новых направлений. В таких условиях традиционные методы управления САРЕХ, основанные на статистических моделях, становятся устаревшими и неэффективными, что требует разработки новых, более гибких и быстрых подходов, например, таких как цифровое моделирование.

Предметом анализа данной работы является систематизация современных научных методов к оптимизации затрат, предлагаемых в научных публикациях, с акцентом на современные подходы цифрового моделирования.

Проведенный мной анализ литературы позволил выделить основной тренд: подход, основанный на детализированном финансовом моделировании активов с созданием их цифровых двойников, интегрирующих данные о техническом состоянии и рыночных ценах ОРЭМ. Также есть авторы, которые исследуют возможность применения динамических имитационных моделей для сценарного планирования инвестиций с учетом изменения регуляторной политики [1]. Вопросы оптимизации распределения капитала между модернизацией существующих активов, таких как ТЭС и ГЭС, и развитием новых — СЭС и ВЭС, в условиях ограничений также рассматривается в современных работах.

Научная новизна проведенного литературного обзора заключается в комплексном анализе международных методик цифрового моделирования САРЕХ и возможном применении данных подходов к российскому рынку электроэнергетики и выявление наиболее адаптивных.

Полученные результаты позволяют сформировать методическую основу и определить приоритетные направления внедрения цифровых моделей САРЕХ. Результаты обзора формируют базу под разработку адаптированных моделей для повышения обоснованности САРЕХ генерирующих компаний.

Литература

1. **Ярлова Т.В., Ивлева И.В.** О концепции модели цифровой трансформации электроэнергетических компаний // Вестник Академии знаний. 2023. №1(54).

В.О. Кочкаев, студ.; рук. Е.В. Сухарева, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ЗАТРАТАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТЭК НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В современных реалиях экономической нестабильности и ужесточения конкурентной среды продолжает возрастать актуальность эффективного управления затратами на предприятиях ТЭК. Цифровая трансформация логистических процессов открывает новые возможности в этом направлении, позволяя перейти от реактивной к проактивной модели управления затратами, основанной на прогнозировании и превентивном устранении негативных факторов [1]. Целью данной работы является систематизация подходов к внедрению цифровых решений для управления логистическими затратами в ТЭК и оценка их потенциального эффекта.

В настоящем научном исследовании совершенствование модели логистических затрат производится на примере схемы поставок угля от «Окино-Ключевского» месторождения до станции «Загустай», которая характеризуется значительными экономическими и техническими дисфункциями, связанными с использованием автомобильного транспорта, а также преобладанием ручного труда, в части прогнозирования и обслуживания логистической инфраструктуры.

В рамках разработки альтернативного варианта логистической схемы поставок угля в научной работе построен математический аппарат с затратной моделью, в которых формализован полный переход на железнодорожные перевозки, с интеграцией комплекса цифровых решений, включая: технологии искусственного интеллекта, с целью прогнозирования спроса и оптимизации работы склада; внедрение блокчейн-платформы с целью автоматизации документооборота; а также внедрение IoT-инфраструктуры и цифрового двойника, с целью превентивного обслуживания логистической инфраструктуры. Ниже, в таблице 1 представлены экономические параметры текущей и предлагаемой логистических схем поставок угля.

Таблица 1. Затраты на перевозку угля от «Окино-Ключевского» разреза до станции «Загустай»

Показатель	В текущей модели	В новой модели
Логистические затраты на одну тонну угля	697 руб.	309 руб.
Годовые затраты на логистику	2 413 886 255 руб.	1 053 266 630 руб.

Литература

1. Цифровая трансформация: тенденции и перспективы. [Электронный ресурс]. URL: <https://izd-mn.com/PDF/57MNNPK23.pdf> (Дата обращения: 23.10.2025)

А.Е. Марат, студ.; рук. Ю.Г. Коломиец, доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВО СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

Республика Тыва является энергодефицитным и удаленным регионом Российской Федерации, где преимущественная часть населенных пунктов не подключена к централизованным электрическим сетям. Территория отличается сложными природно-климатическими условиями и низкой плотностью населения. Актуальность работы заключается в необходимости повышения надежности электроснабжения малых поселений и снижением зависимости от использования дизельного топлива.

Объектом исследования является проект строительства солнечной электростанции (СЭС) для поселка Бояровка Каа-Хемского кожууна Республики Тыва, расположенного в восточной части региона, численность населения составляет около 631 человека [1].

Цель исследования является технико-экономическое обоснование строительства солнечной электростанции для обеспечения электрической энергией потребителей села Бояровка. Для обоснования моей работы был выполнен расчет потребления электроэнергии исходя из среднего бытового спроса $300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ в месяц на одно домохозяйство. При ориентировочном числе жилищных домов ≈ 180 (учитывая среднюю плотность населения и среднестатистическую семью 3–4 человека), годовое потребление поселка составит $650 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ в год. Для покрытия этой потребности требуется СЭС установленной мощностью ориентировочно 400 кВт с аккумуляторным накопителем и резервным дизель-генератором.

В процессе исследования рассчитаны годовые эксплуатационные издержки, капитальные вложения и проведена оценка экономической эффективности проекта. Полученные результаты свидетельствуют, что проект является экономически целесообразным: срок окупаемости составит 10–15 лет, чистый дисконтированный доход положительный при действующих тарифах на электроэнергию.

В результате исследования, строительство солнечной электростанции в поселке Бояровка обеспечивает энергетическую независимость, улучшает качество жизни населения и способствует развитию возобновляемой энергетики в Республике Тыва.

Литература

1. **Официальный сайт** Википедия — [Электронный ресурс] — <https://ru.wikipedia.org/wiki>
2. **Официальный сайт** Министерство энергетики РФ. Энергетическая стратегия России до 2035 года — [Электронный ресурс] — <https://minenergo.gov.ru/>

*В.В. Гольдич, студ.;
рук. В.В. Бологова, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В теплоэнергетической сфере одной из главных задач является бесперебойное и качественное обеспечение потребителей необходимым количеством теплоты. Для поддержания надежности теплоснабжения, необходимо регулярно проверять и менять тепловые трубы, а также реконструировать центральные тепловые пункты, что определяет актуальность данной темы [1].

В работе рассматривается состояние систем теплоснабжения Северо-Восточного административного округа. Основными проблемами являются: увеличение числа потребителей связанные с проектом реновации и изношенное состояние имеющихся тепловых сетей. Решить эти проблемы можно путём проведения реконструкции. Реализация данного проекта позволит снизить эксплуатационные затраты, а также повысить эффективность работы систем теплоснабжения.

В ходе работы были рассмотрены варианты тепловой сети, способы прокладки, материалы труб и материалы изоляции. Мною был выбран участок трубопровода, проложенный в 1982 году, находящийся в эксплуатации и обслуживаемый ПАО «МОЭК». Материал трубопровода — сталь. Материал изоляции — минеральная вата. Тип прокладки трубопровода — непроходной канал. При расчете выяснилось, что суммарные потери тепловой энергии составляют 23,91 Гкал в год. Чтобы уменьшить потери, а также сократить эксплуатационные затраты была предложена реконструкция участка тепловой сети — замена трубопровода на пенополиуретановый [2]. Результаты расчета показали, что после реконструкции суммарные потери тепловой энергии снизились примерно в 2,5 раза и составили 9,52 Гкал.

В результате реконструкции системы теплоснабжения предлагаемый вариант позволил сократить потери теплоты в 2,5 раза, а также сократить расход теплоносителя, что привело к уменьшению эксплуатационных затрат. Срок окупаемости проекта реконструкции составит 8–9 лет, что свидетельствует об экономической эффективности мероприятия [3].

Литература

1. **Приказ Минэнерго России от 14.05.2025 N 511** «Об утверждении Правил технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок».
2. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: Учебник для ВУЗов — 7-е изд., стереот. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 472 с.
3. **Роголёв Н.Д.** Экономика энергетики. — М.: Издательство МЭИ, 2021. — 403 с.

А.А. Дзюина, студ.; рук. В.В. Бологова, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АО НДЦ НПФ «РУССКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»

В современных рыночных условиях важным для любого предприятия является поддержание и повышение его конкурентоспособности, что можно получить за счет расширения экономической деятельности, обеспечения качества продукции, а также гибкой адаптации к изменяющейся конъюнктуре рынка [1].

Целью данной работы являлась оценка экономической эффективности расширения экономической деятельности на примере АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория». АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория» оказывает услуги в области промышленной безопасности опасных производственных объектов. Компания выполняет комплексное сопровождение строительства новых промышленных объектов и сопровождение эксплуатируемых объектов. В том числе проводит экспертизы промышленной безопасности, техническое диагностирование, разрушающий и неразрушающий контроль, сертификацию, паспортизацию, строительный контроль, экологический контроль и независимую инспекцию. Для достижения поставленной цели было проведено исследование хозяйственной деятельности и производственных затрат компании, на основании которого осуществлялся поиск скрытых резервов и разрабатывался механизм более эффективного использования ресурсов в целях повышения эффективности предприятия. [2] Проведенный анализ финансово-экономической деятельности организации показал снижение прибыли за последние 2 года (причина — увеличение операционных расходов), рост зависимости от заемных средств. По итогу анализа было предложено расширить долю рынка за счет технологического развития и диверсификации производства.

Проведенные расчеты подтвердили целесообразность реализации предлагаемых мероприятий по расширению экономической эффективности деятельности предприятия. После проведения мероприятий по расширению деятельности рентабельность продаж компании выросла на 1.5–2.5%, а срок окупаемости составил 5 лет. Основываясь на проведенной оценке, можно предложить разработку и внедрение проекта расширения экономической деятельности.

Литература

1. **Афанасьева, А.Б.** Оценка эффективности деятельности предприятия / А.Б. Афанасьева. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — № 37 (432). — С. 27–29. — URL: <https://moluch.ru/archive/432/94964>.
2. **Рогалёв Н.Д.** Экономика энергетики. — М.: Издательство МЭИ, 2021. — 403 с.

В.Е. Баранов, студ.;
рук. В.В. Бологова, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В современных условиях развития технологий и цифровизации экономики инвестиционная деятельность становится неотъемлемым компонентом для предприятий. При разработке и реализации инвестиционных проектов необходимо обеспечить привлекательность для всех участников, в т. ч. обеспечить соответствующее качество тепловой энергии для потребителей, что определяет актуальность работы.

В работе был проведен анализ состояния тепловых сетей района Измайлово и качества теплоснабжения этого района организацией ПАО «МОЭК». Проведенные исследования показали, что в теплоснабжении основной проблемой является неудовлетворительное состояние тепловой сети. Это определяется, во-первых, большой степенью ее износа, и, во-вторых, невозможностью обеспечить увеличение объема передачи тепловой энергии в результате роста спроса на нее существующих потребителей или подключения новых потребителей, т.к. сеть на это не рассчитана. Для анализируемого участка тепловой сети характерна высокая степень износа, что требует разработки инвестиционного проекта по реконструкции сети. При выполнении работы авторами были определены:

- инвестиционные затраты в проект исходя из протяженности участка тепловой сети и варианта реконструкции;
- величина снижения потерь тепловой энергии при передаче;
- изменение текущих эксплуатационных затрат.

Расчеты проводились при условии обеспечения качества горячей воды (температуры) для потребителя [1]. Оценка экономической эффективности проводилась на основании учета инвестиций в реконструкцию и изменений текущих эксплуатационных затрат. Критерием являлся срок окупаемости, а положительным эффектом от проекта — сумма снижения затрат на ремонт и снижение потерь в стоимостном выражении [2].

Проведенная оценка экономической эффективности предлагаемого инвестиционного проекта показала экономическую целесообразность его реализации: эксплуатационные затраты снизятся примерно в 2,1 раза за счет снижения потерь теплоносителя и затрат на ежегодные ремонты. Срок окупаемости инвестиционного проекта составил около 5 лет.

Литература

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: Учебник для ВУЗов — 7-е изд., стереот. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 472 с.
2. **Рогалёв Н.Д.** Экономика энергетики. — М.: Издательство МЭИ, 2021. — 403 с.

К.Т. Таджидинова, студ.;
рук. Д.В. Никифорова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВО ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА КУРИЛЬСКОМ ОСТРОВЕ ПАРАМУШИР

В условиях современного мира наблюдается тенденция к устойчивому развитию и поиску альтернативных источников энергии, которые могут заменить традиционные ископаемые виды топлива. Особенно актуально это для удалённых и изолированных энергорайонов, таких как Курильская гряда, остров Парамушир. Заместитель министра энергетики Сахалинской области Илья Колосков отметил, что энергетика Парамушира в настоящее время опирается на дизельные электростанции и угольные котельные, часть из которых требует комплексной модернизации. Экономически обоснованный тариф на электроэнергию составляет более 20 руб. за кВт*ч и 12 тыс. руб. за Гкал, что в рамках тарифного регулирования требует ежегодных бюджетных субсидий в размере свыше 360 млн руб. Экономика этой территории базируется на развитии рыбоперерабатывающей и туристской отраслей, что предъявляет особые экологические требования к топливно-энергетическому комплексу. Повышенный интерес бизнеса к реализации проектов в этих сферах, а также строительство жилья и социально-значимых объектов способствует росту энергопотребления. Всё это создаёт необходимость в расширении и усовершенствовании генерирующих мощностей в регионе.

В ходе проведения комплексного анализа было выявлено, что для решения данных вопросов развитие ветроэнергетики является наиболее перспективным. Во-первых, ветровой потенциал региона позволяет обеспечить эффективное и экономически выгодное производство электроэнергии. Во-вторых, ветряные электростанции имеют относительно низкие эксплуатационные расходы, что снижает себестоимость электроэнергии и делает её более доступной для потребителей. Кроме этого, ветроэнергетика способствует снижению углеродного следа и борьбе с изменением климата.

В России наблюдается рост рынка ВИЭ, особенно в удалённых и труднодоступных районах, таких как Парамушир, поэтому вложения в эту сферу становятся более привлекательными для инвесторов.

Литература

1. Информационное агентство «АСТВ» (ASTV.RU) [Электронный ресурс] — URL: <https://astv.ru/news/politics/2024-07-19-krdv-obsudila-perspektivy-razvitiya-energetiki-kuril-skogo-ostrova-paramushir?ysclid=mgng88bti0338342413>

*М.А. Власенкова, студ.;
рук. Д.В. Никифорова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА СЭС В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН

Республика Дагестан испытывает устойчивый рост энергопотребления, который существенно опережает темпы собственной выработки электроэнергии. Сегодня собственные генерирующие мощности покрывают лишь часть регионального спроса (потребление и производство составляют 9 млрд кВт часов и 5 млрд кВт часов соответственно), из-за чего приходится полагаться на пере-токи из соседних энергосистем. Ситуация усугубляется реализацией в ближайшее время крупных инфраструктурных и туристических проектов (общее потребление составит 226 МВт), которые ещё больше увеличат нагрузку на энергосеть [1]. В этих условиях развитие солнечной энергетики выглядит не просто перспективным, а стратегически необходимым решением, особенно с учётом общероссийской повестки перехода к устойчивым источникам энергии.

Ключевая проблема заключается не только в сильном дефиците генерирующих мощностей, но и высокой зависимости от ископаемого топлива. Особенно остро это ощущается в удалённых районах, где многие объекты инфраструктуры обеспечиваются электроэнергией за счёт дизельных генераторов, что порождает высокие эксплуатационные затраты, нестабильность электроснабжения и негативное воздействие на экологию.

В качестве эффективного решения предлагается строительство СЭС для энергоснабжения туристической базы «Old Sivukh». Проект опирается на высокий уровень солнечной инсоляции в регионе и наличие свободных территорий. Суть решения заключается в частичной компенсации электрической энергии, вырабатываемой дизельным генератором, за счёт солнечной энергии. При этом реализация проекта предусматривает использование доступных механизмов господдержки в сфере ВИЭ.

Внедрение СЭС обеспечит стабильное и надёжное энергоснабжение, что особенно важно для развития туристической инфраструктуры. Одновременно существенно снижается экологическая нагрузка благодаря сокращению выбросов парниковых газов, а также уменьшаются операционные расходы. В перспективе это открывает широкие возможности для развития распределённой солнечной генерации в удалённых районах со схожими природно-климатическими условиями.

Литература

1. **Официальный сайт «Это Кавказ»** — [Электронный ресурс] — <https://etokavkaz.ru/dagestan/s-nadezhdoi-na-solntce-kak-energetika-dagestana-vstrechaet-novuyu-epokhu>

*Д.О. Охлопков, студ.;
рук. Ю.Г. Коломиец, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

УЧЁТ КОСВЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ОТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ВЭС В МОДЕЛИ DCF

Современное развитие ветроэнергетической отрасли характеризуется активным внедрением цифровых технологий, в том числе цифровых двойников, систем предиктивной аналитики и дистанционного мониторинга, однако традиционные методы оценки экономической эффективности, в частности модель дисконтированных денежных потоков (далее — DCF), учитывают лишь прямые эффекты цифровизации, игнорируя косвенные выгоды, возникающие вследствие повышения надёжности, оптимизации производственных процессов и продления срока службы оборудования. Целью данной работы является усовершенствование модели DCF для оценки экономической эффективности цифровизации ветряных электростанций (далее — ВЭС) с учётом косвенных эффектов от цифровизации.

На основе анализа литературы, современных подходов и практики компаний Vestas, GE Renewable Energy и Siemens Gamesa авторами выявлено, что цифровизация снижает операционные затраты до 10%, повышает коэффициент готовности оборудования, повышает точность прогнозов выработки электроэнергии, увеличивает срок службы турбин на 5–7 лет и повышает качество планирования ресурсов [1]. Некоторые из перечисленных эффектов не отражаются в финансовых потоках, но при включении денежных потоков от указанных косвенных эффектов в модель DCF, они приводят к росту показателей NPV и IRR проекта, а также уменьшению показателя DPBP.

Предлагаемая авторами модель учитывает «условные денежные потоки», которые определяются с помощью разработанных «цифровых мультипликаторов» — корректирующих коэффициентов, отражающих степень влияния внедрения цифровых технологий на денежные потоки. Данные коэффициенты формируются на основе множества данных, как, например, данных по среднегодовому количеству часов внепланового простоя оборудования до цифровизации и т.д.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности расчётов инвестиционной привлекательности цифровых проектов в сфере ВИЭ, а также в возможности обоснования решений о внедрении цифровых двойников на этапе планирования и эксплуатации ВЭС.

Таким образом, учёт косвенных эффектов цифровизации в модели DCF позволяет более полно оценить вклад цифровых технологий в повышение эффективности ветроэнергетических активов и обосновать их финансовую целесообразность

Литература

1. Цифровая трансформация отраслей. hse.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/462977876.pdf>. (дата обращения: 18.09.2025).

Г.У. Халимова, студ.; рук. Д.В. Никифорова, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ГЭС ДЛЯ УСТАНОВКИ ПЛАВУЧИХ СЭС

Мировой спрос на энергию постоянно растёт, одновременно с этим стоит острая задача снижения выбросов парниковых газов и перехода к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Солнечные электростанции (СЭС) требуют значительных площадей для размещения, и в жарком климате перегрев модулей способствует падению выработки электроэнергии. Плавающие СЭС позволяют решить обе проблемы, так как в России существует огромное количество водохранилищ, созданных для нужд гидроэлектростанций (ГЭС), обладающих необходимой инфраструктурой. Объединение существующих ГЭС с плавающими СЭС позволяет создать гибридные энергосистемы, которые могут повысить надёжность энергоснабжения и взаимодополнения выработки энергии.

Особенность данного исследования заключается в комплексном подходе к оценке потенциала совместного использования водохранилищ ГЭС и плавающих СЭС, охватывающий системный анализ, изучение гибридных систем генерации электроэнергии, изучение влияния на водные экосистемы, а также анализ инновационных технических решений.

По результатам анализа, потенциальная годовая выработка электроэнергии может составить 351 ТВт*ч/год при условии размещения солнечных панелей на 30% площади крупных водохранилищ ГЭС. Однако, это является оптимистичной оценкой. Учитывая ограничения, связанные с необходимостью поддержания судоходства и экологической безопасности, а также снижением инсоляции в северных регионах и падением эффективности в зимний период, реальные показатели могут быть на 30–40% ниже, составив примерно 228 ТВт*ч/год. Практический потенциал оценивается в диапазоне 230–350 ТВт*ч/год — это стратегически значимый объём, сопоставимый с 20–30% всего производства электроэнергии в России.

Данное исследование может послужить основой для проектирования и внедрения плавающих СЭС на водохранилищах ГЭС в России, что поспособствует развитию сложных энергосистем, сочетающих гидро- и солнечную генерацию. Интеграция плавающих солнечных электростанций в существующую энергетическую инфраструктуру ГЭС направлена на значительное увеличение доли ВИЭ в общем энергобалансе.

Литература

1. Научно-информационный центр МКВК [Электронный ресурс] — Режим доступа: Научно-информационный центр МКВК Центральной Азии/Информационный бюллетень.

О.И. Фадеев, студ.;
рук. И.С. Андрюшина, к.э.н., профессор (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ИНДЕКСА ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ

Активная цифровая трансформация энергетики требует объективных инструментов оценки, адаптированных к специфике ее сегментов. Существующие общие индексы цифровизации не всегда отражают ключевые аспекты деятельности генерирующих компаний, что создает методологические проблемы [1]. Поэтому разработка комплексного интегрального индекса цифрового развития (ИЦР), позволяющего перейти от качественных оценок к точным количественным показателям технологической зрелости, является актуальной отраслевой задачей современного этапа развития.

Методология построения индекса должна включать синтез отраслевых требований и экспертного опроса [2]. Для полноты охвата можно предложить структуру, состоящую из четырех субиндексов: «Цифровая инфраструктура», «Интеллектуальные операции», «Новые бизнес-модели» и «Управление преобразованиями». В рамках каждого субиндекса должна быть сформирована система количественных показателей.

Агрегация субиндексов в интегральный ИЦР может быть осуществлена на основе весовых коэффициентов, определенных методом парных сравнений. Данный подход позволит обеспечить обоснованность, объективность и сопоставимость результатов расчетов.

Применение разработанного инструмента даст возможность проводить сравнительный анализ между разными компаниями, выявлять ведущие отраслевые практики и проблемные области, требующие дополнительных инвестиций и управленческих усилий. В результате можно будет формировать обоснованные стратегии цифровой трансформации отрасли, наглядно демонстрировать как сильные стороны, так и возможные ограничения развития.

Такой подход способствует системному и стратегическому управлению цифровыми преобразованиями в энергетике. Это важное условие повышения ее эффективности, надежности и конкурентоспособности в условиях быстро меняющихся технологических и рыночных условий.

Литература

1. Цифровая энергетика: видение, практики, технологии. Информационно-аналитические работы — Инфраструктурный центр EnergyNet, 2018.
2. **Череповицын А.Е., Третьяков Н.А.** «Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере» — Записки Горного института, 2023.

Д.Е. Романов, студ.;
рук. Д.В. Никифорова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВНЕДРЕНИЕ ИОТ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ: СТРАТЕГИЯ ПАО «РОССЕТИ»

Актуальность развития интернета вещей (IoT) обусловлена возможностями для повышения эффективности и надёжности работы электросетевого оборудования ПАО «Россети» в условиях цифровизации энергетики. Внедрение передовых технологий позволяет компании соответствовать современным стандартам энергоснабжения и снижать потери электроэнергии.

В результате проведённого анализа текущего состояния выявлены высокие технические потери, морально устаревшая система мониторинга, недостаточная оперативность в выявлении и устранении неисправностей. Из-за этого возникают значительные затраты и снижается надёжность энергоснабжения.

Внедрение системы дистанционного мониторинга и управления электросетью в реальном времени позволяет решить эту проблему.

На предприятии целесообразно использовать:

- Интеллектуальные системы управления нагрузками;
- Мониторинг подстанций и линий электропередачи;
- Автоматизацию обнаружения аварий.

Выявлены следующие эффекты от внедрения технологии:

- Снижение технических потерь;
- Сокращение затрат на обслуживание оборудования, сокращение средней продолжительности прекращений передачи электрической энергии до 40% [2];
- Повышение надёжности электроснабжения;
- Развитие инновационных услуг.

Внедрение IoT в ПАО «Россети» экономически обоснованно и необходимо для модернизации электросетевого комплекса, что подтверждается достигнутыми положительными результатами. Вследствие этого повысится эффективность деятельности, а успешная реализация приведёт к повышению инвестиционной привлекательности компании.

Литература

1. **Баланов А.Н.** Цифровая энергетика. Системы управления, интеграция, оптимизация, прогнозирование спроса. — М.: Инфра-М, 2020.
2. **Годовой отчет** ПАО «Россети Московский регион» за 2024 год –Показатели надёжности электроснабжения. [Электронный ресурс] — https://rossetimr.ru/upload/iblock/043/s2mvg39y38fxauay2guyc2zf1gk4mc/Rosseti_MR_AR_2024_book_2307.pdf

Г.М. Ильинский, студ.;
рук. А.Ю. Амелина, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА ТЕПЛОЗАЩИТУ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Повышение энергоэффективности зданий связано с противоречием: рост капитальных вложений в теплозащиту ограждений снижает эксплуатационные затраты на отопление, но увеличивает начальную стоимость. Нормативный подход задаёт минимальные требования к теплозащите, но не решает задачу оптимизации затрат и не даёт инструмента учёта капитальных и текущих расходов, что отмечено в [1–3].

Цель исследования — разработка модели определения оптимального соотношения капитальных и эксплуатационных затрат на теплозащиту и систему отопления жилого здания на основе анализа стоимости жизненного цикла проекта с учетом энергоэффективности здания. Объектом является энергосистема здания, в которой уровень утепления определяет требуемую мощность и стоимость теплоснабжения; задача модели — найти экономически обоснованный баланс между этими элементами.

Методологической основой служит анализ и оптимизация капитальных затрат: капитальные вложения в утепление и систему отопления сопоставляются с дисконтированными расходами на отопление за срок службы здания с учётом тарифов и климата региона.

Научная актуальность работы обусловлена включением параметров энергоэффективности здания в совместный анализ капитальных и эксплуатационных затрат на этапе концептуального проектирования, что позволяет количественно уязвать выбор уровня теплозащиты с требуемой мощностью системы отопления.

Применение модели на предпроектной стадии позволяет выбирать обоснованный уровень утепления и параметры системы теплоснабжения, снижая дисконтированные затраты за жизненный цикл здания.

Литература

1. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Оптимизация энергоэффективности зданий на основе оценки стоимости жизненного цикла. Энергосовет, 2015. № 3. С. 55–62.
2. Васильев Г.П., Личман В.А. Эффективный уровень теплозащиты зданий с учетом стоимости жизненного цикла. АВОК, 2015. № 6. С. 54–61.
3. Табунчиков Ю.А., Ковалев И.Н. Особенности оптимизации толщины утеплителя наружных стен здания. Системные аспекты. Энергосбережение, 2017. № 8. С. 120–127.

*Б.А. Габидуллаева, студ.;
рук. Д.А. Смирнова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА БИЗНЕС-ПЛАНА ПРОЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА ВЭС В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

На сегодняшний день переход к ВИЭ является одним из приоритетных направлений мировой и национальной энергетической политики. Горные территории обладают значительным ветровым потенциалом, что открывает возможности для развития ветроэнергетики, однако их отличают сложные природно-климатические и инженерные условия. В этих условиях разработка экономически обоснованного бизнес-плана строительства ВЭС способствует повышению энергетической независимости региона и снижению углеродного следа.

В ходе проведённого исследования была определена необходимость комплексного подхода к планированию строительства ВЭС в горной местности, включающего оценку ветрового потенциала, выбор оптимальной площадки, подбор оборудования и расчёт ключевых параметров станции. Особое внимание уделено обоснованию экономической эффективности проекта и определению его инвестиционной привлекательности. Реализация подобного проекта требует глубокого анализа природных условий, технологических ограничений и социальных факторов, влияющих на устойчивость развития региона.

Целью работы является разработка комплексного бизнес-плана строительства ВЭС в горной местности с оценкой экономической эффективности и перспектив внедрения проекта. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: проанализировать потенциал ветровых ресурсов региона; определить наиболее подходящую площадку для строительства; осуществить выбор оборудования и расчёт производственных параметров; разработать инвестиционный и финансовый планы; провести оценку экономических, экологических и социальных эффектов.

Таким образом, выполненный анализ показал, что строительство ВЭС в горной местности при правильном выборе площадки и учёте технико-экономических параметров является рентабельным и экологически оправданным. Реализация проекта будет способствовать развитию «зелёной» энергетики, повышению энергетической устойчивости региона и созданию новых рабочих мест.

Литература

1. **Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.** Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы. Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003.

М.О. Моисеенко, студ.;
рук. Е.В. Сухарева, д.э.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ЭКСПОРТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ФОНЕ САНКЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ

Текущий геополитический кризис кардинальным образом изменил внешнеполитические и внешнеэкономические стратегии России и поставил ее перед необходимостью адаптации к новым реалиям [1]. В связи с беспрецедентным санкционным давлением на российский ТЭК, появилась потребность в срочной переориентации экспортных потоков и оценке возникающих при этом рисков и возможностей.

Цель исследования — провести количественную оценку перспектив и достигнутых результатов диверсификации экспорта российских энергоресурсов по товарным группам и географическим направлениям в условиях санкций.

В работе был проведён комплексный анализ специализированной литературы, научных публикаций и аналитических отчетов, посвященных проблематике трансформации структуры экспорта энергоресурсов в условиях геополитической нестабильности и санкционных ограничений. С помощью подбора и адаптации методического инструментария был обоснован выбор перспективного географического направления, а именно азиатского (Китай, Индия, Турция), в которое в 2022 году уже был переориентирован экспорт на 65%, а в 2025 году переориентация подошла к концу и составила около 80%. Произошли следующие сдвиги товарных групп: продажа нефти и угля в физическом объёме увеличилась, природного газа — сильно снизилась. Из-за изменений стали неизбежны выпадающие объёмы поставок. Самой успешной стала компенсация нефти и нефтепродуктов за счёт Азии. Газ, напротив, не удалось компенсировать полностью. Ключевыми ограничениями стали пропускная способность Восточного полигона и зависимость от импорта технологий для СПГ. Можно сделать вывод об успешной адаптации и смягчении удара, но не о полной и равноценной замене потерянного европейского рынка. Для достижения оптимистичных перспектив необходимо строительство новых газопроводов на Восток, развитие отечественных технологий переработки и технологий СПГ для предотвращения избыточной «трубопроводной зависимости», которая теперь может стать критической [2].

Литература

1. **Александров Д.Г., Колпаков П.А., Матиив В.М.** Диверсификация национального экспортного энергопакета России в условиях экономических санкций и диверсификации на газопроводах: «Северный поток» и «Северный поток-2» // Экономика строительства. 2023. № 1.
2. Новая диверсификация на рынках газа. Энергетические тренды. М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. 2022. Выпуск № 107. — 9 с.

*Е.К. Самойлов, студ.;
рук. Е.Б. Гончарова, к.э.н., доцент (НИУ«МЭИ»)*

УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В РАМКАХ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

Актуальность исследования обусловлена ключевой ролью топливно-энергетического комплекса в обеспечении энергетической безопасности и устойчивого экономического роста как на национальном, так и на региональном уровнях. В условиях глобальных вызовов: декарбонизации, технологической трансформации и геополитической нестабильности, стратегическое управление топливно-энергетическим комплексом приобретает особую значимость. Особенно остро этот вопрос стоит в Центральном федеральном округе, где практически отсутствует системный подход к интеграции развития в региональные стратегии. Это требует разработки эффективных механизмов управления, для консолидации федеральных целей и территориальных возможностей.

Особенностью данного исследования является комплексный подход к анализу топливно-энергетического комплекса как многоуровневой экономической системы, включающей как макроуровневое регулирование, так и региональную специфику. В работе рассматриваются организационные аспекты стратегического развития с акцентом на выявление дисбалансов между приказами и региональной реализацией.

Совершенствование механизмов управления развитием топливно-энергетическим комплексом на региональном уровне может способствовать повышению энергоэффективности, снижению экологической нагрузки и усилению инвестиционной привлекательности регионов. Предлагаемые в исследовании направления стратегического развития позволяют формировать гибкие инструменты адаптации к изменяющимся внешним условиям.

Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.
2. **Мартынова Е.В.** Проблемы стратегического управления инновационным развитием компаний ТЭК // Научные труды Вольного экономического общества России. 2015. № 2.
3. Методические рекомендации по разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития субъекта Российской Федерации и плана мероприятий по ее реализации. Утверждены приказом Министерства экономического развития РФ от 23 марта 2017 г. № 132.

А.А. Пузырев, студ.; рук. Д.В. Никифорова, ст. пр. (НИУ «МЭИ»)

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ АТМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Атомная энергетика остается одним из ключевых элементов глобальной энергетической системы, обеспечивая стабильное и надежное производство электроэнергии с минимальным воздействием на окружающую среду.

Цель исследования — выявить взаимосвязь между внедрением цифровых технологий в атомных энергетических компаниях и повышением эффективности работы данных компаний. Для достижения цели, авторами были проанализированы различные источники информации, которые показали: применение цифровых технологий на АЭС напрямую влияет на снижение себестоимости производства электроэнергии и снижение времени незапланированного простоя АЭС.

Цифровизация АЭС — это дорогостоящий и трудоемкий процесс. По данным Росатома внедрение платформы «цифровая АЭС» на одной станции оценивается в 10–15% от эксплуатационных затрат, что составляет от 100 до 300 млн. долларов.

Исходя из данных в открытых источниках видно, что цифровизация Атомной электростанции имеет следующие позитивные эффекты: уменьшение топливных затрат на 8–15%, снижение затрат на технические ремонты и обслуживание на 10–15%, сокращение потерь от простоев станции на 15–12%. Общая экономия составила более 1 млрд. рублей в 2019 году. В 2023 году выручка от цифрового бизнеса составила 39,9 млрд. рублей, что в 9 раз больше по сравнению с 2021 годом. Также, немаловажным фактором является сокращение рисков, связанных с эксплуатацией АЭС, за счет создания цифровых двойников станций и преждевременного выявления возможных проблем.

В результате анализа данных видно, что срок окупаемости мероприятий в цифровизацию одной АЭС составляет от 5 до 10 лет. Сокращение себестоимости производства электроэнергии составляет 10–15%, с среднесрочной перспективой сокращения издержек еще на 15–20%. Это демонстрирует экономическую целесообразность внедрения цифровых технологий в атомную энергетику.

Литература

1. **Официальный сайт** Росатом — <https://rosatom.ru/index.html>
2. **Годовой отчет** Госкорпорации «Росатом» за 2019–2023 годы.
3. **Материалы по** Единой цифровой стратегии и производственной системе Росатома.

К.А. Сырцова, студ.; рук. Д.А. Фрей, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Строительство электросетевых объектов характеризуется сложностью, зависимостью от согласований и сжатыми сроками. Применяемые методы оценки эффективности, например, сбалансированная система показателей, модели управления затратами [1] и метод освоенного объёма имеют ограничения, поскольку не всегда учитывают отраслевую специфику и могут быть излишне громоздкими для оперативного управления.

Для решения этой проблемы была разработана трехуровневая модель оценки, которая объединяет финансовые, временные, качественные и цифровые аспекты бизнес-процессов. Модель включает уровни бизнес-процессов, критериев и ключевых показателей эффективности и основана на пяти взаимосвязанных критериях с соответствующими показателями:

- **Взаимодействие с заинтересованными сторонам:** Длительность реакции ответа (дни); Индекс удовлетворенности (%).
- **Соответствие техническим и нормативным требованиям:** Количество выявленных замечаний (шт); Качество исполнения (руб./руб).
- **Выполнение по графику производства работ:** Выполнение плана по объему работ (%); Соблюдение графика (дни/дни); Непревышение фактической стоимости процесса над первоначальной стоимостью (руб./руб); Рентабельность БП (руб./руб); Оплата выполненных работ по проекту (руб./руб); Отсутствие несчастных случаев (шт); Укомплектованность персоналом (%).
- **Использование ИТ систем:** Удовлетворённость пользователей ИТ систем, %; Количество заявок на поддержку ИТ систем (шт).
- **Общепроцессный критерий:** Отклонение выполнения бизнес-процесса от нормативного срока (дни); Цифровая зрелость (%); Производительность бизнес-процесса (шт/дни).

Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для оперативного контроля, выявления «узких мест» и обоснования управленческих решений. Внедрение модели помогает соблюдать нормативные сроки, повысить производительность труда и снизить риски при строительстве электросетевых объектов.

Литература

1. **Кондраков Н.П.** Бухгалтерский (финансовый, управленческий) учёт : учебник / Н.П. Кондраков. — М. : Проспект, 2006. — 448 с.

Ю.В. Филипюк, студ.; рук. А.Ю. Амелина, к.э.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА

Высокий уровень износа производственных активов электросетевого комплекса и стагнация показателей надежности делают традиционные планово-предупредительные подходы недостаточно эффективными, что усиливает потребность в внедрении цифровых технологий, включая цифровые двойники. Существующие исследования освещают отдельные аспекты цифровых двойников, но не предлагают целостной методологии, объединяющей выбор пилотного объекта, разработку модели и ее интеграцию в операционную деятельность. Целью работы является создание методического подхода к внедрению цифрового двойника, который обеспечивает снижение рисков, повышение надежности и получение измеримых технико-экономических эффектов [1].

Эмпирический анализ ПАО «Россети Урал» выявил ключевые барьеры: разобщённость ИТ-систем, отсутствие онлайн-диагностики, длительные циклы принятия решений и зависимость от субъективных экспертных заключений. Данные за 2022–2024 гг. показали отсутствие улучшения SAIDI/SAIFI и сохраняющиеся сверхнормативные потери, что подтверждает ограниченность традиционных мер. Также было установлено, что цифровой двойник, особенно для силовых трансформаторов, способен устранить эти проблемы за счет перехода к предиктивному управлению и повышению качества данных [1].

Разработанный подход включает многокритериальную модель выбора пилотного процесса и четырехэтапный алгоритм реализации: подготовка «Фундамента», разработка модели, ее проверка по формализованной методике и масштабирование с изменением регламентов и KPI. Такой подход учитывает как прямые, так и косвенные эффекты цифровизации — ускорение управленческого цикла, повышение точности диагностики и устранение информационных разрывов между подразделениями [1].

Практическая апробация на пилотной группе автотрансформаторов 220 кВ показала значимые результаты: снижение ОПЕХ на 24%, исключение затрат на замену одной единицы оборудования, сокращение отказов на 37,5% и уменьшение цикла принятия решений почти в 23 раза. Эти данные подтверждают применимость и эффективность предложенной методологии для электросетевых компаний.

Таким образом, интеграция организационных, технических и экономических факторов в единый методический подход позволяет объективно оценить потенциал цифровых двойников и обеспечивает системное повышение надежности и эффективности бизнес-процессов электросетевого комплекса.

Литература

1. Белоглазов И.И., Лаврентьев А.С. Методология создания цифровых двойников электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № 4 (73). — С. 34–40.

Направление VIII
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
И ТЕПЛОФИЗИКА
Nuclear energy and thermophysics

Руководитель направления:
Директор института тепловой
и атомной энергетики НИУ «МЭИ»,
д.т.н., член-корр. РАН
Дедов Алексей Викторович

Секция 42
АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ
И УСТАНОВКИ
Nuclear power plants and installations

Председатель секции: к.г.н., доцент Хвостова Марина Сергеевна

Секретарь секции: к.т.н. Каверзнев Михаил Михайлович

В.В. Семишин, соиск.;

рук. О.Ю. Кавун, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ ПОЛНОЙ ЗАГРУЗКЕ РЕГЕНЕРИРОВАННЫМ УРАНОВЫМ И УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ

Исследование проводилось для стационарной топливной загрузки длительностью 510 эффективных суток. Рассматривались два типа топлива. Первый — на основе регенерированного урана из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора ВВЭР-1000, содержащего наработанный ^{236}U (выделенный плутоний отправляется на хранение). Второй — РЕМИКС-топливо на основе неразделенной изотопной смеси плутония и урана с плутонием равновесного изотопного состава [1]. В обоих случаях для восстановления размножающих свойств топлива и предполагалось его дообогащение по ^{235}U .

Применение рассматриваемых типов топлива ведет к увеличению абсолютного значения коэффициента реактивности по температуре топлива $\delta\rho/\delta T_{\text{топл.}}$, следствием чего является увеличение температуры повторной критичности $T_{\text{повт. крит.}}$. Помимо этого, изменение спектра нейтронов приводит к снижению эффективности выгорающих поглотителей, аварийной защиты и «мягкого» регулирования, что ведет к необходимости увеличения концентрации борной кислоты в теплоносителе (таблица 1).

Таблица 1. Основные параметры активной зоны

Параметр	Тип топлива		
	Урановое	Регенерат	РЕМИКС
$C_{\text{крит.}} \text{ H}_3\text{BO}_3$, г/кг	7,7	8,0	9,2
$T_{\text{повт. крит.}}$, °C	175	190	235
$\delta\rho/\delta T_{\text{топл.}}$, 1/°C	$-2,84 \cdot 10^{-5}$	$-2,91 \cdot 10^{-5}$	$-3,62 \cdot 10^{-5}$
Эффективность аварийной защиты, %	7,55	7,46	6,05

Полная загрузка топливом на основе регенерированного урана не вносит значительных изменений в нейтронно-физические характеристики активной зоны. В то же время, при полной загрузке РЕМИКС-топливом возникают более жесткие требования к поглощающим элементам СУЗ, требующие использования бора, обогащенного по ^{10}B , или увеличения числа органов управления реактивностью для сохранения эффективности аварийной защиты.

Литература

1. Семишин В.В. Оценка нейтронно-физических свойств активной зоны реактора ВВЭР-1000 при использовании регенерированного уран-плутониевого топлива. // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2023. — № 2. — С. 15–26.

*И.Ш. Кускеев, Е.А. Лебедева., студ.; В.В. Семишин, соиск.;
рук. О.Ю. Кавун, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ВОДО-ВОДЯНОГО РЕАКТОРА СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

В данной работе исследовалась возможность дальнейшего снижения критической концентрации борной кислоты следующими способами: увеличением количества подвижных вытеснителей для усиления эффекта спектрального регулирования, увеличение обогащения твэгов в кассетах для компенсации избыточной реактивности, использование регулирующей группы для компенсации избыточной реактивности.

Показано, что только увеличением числа подвижных вытеснителей добиться значительного снижения критической концентрации борной кислоты не получается. Увеличение в два раза числа вытеснителей позволило снизить критическую концентрацию борной кислоты с 2.35 г/кг [1] до 2 г/кг. Увеличение обогащения твэгов, а именно изотопов гадолиния, в Gd_2O_3 с 8% до 13% дало существенное снижение максимальной критической концентрации борной кислоты до значения 0.6 г/кг. Однако, использование твэгов большого обогащения ведет к большому положительному выбегу реактивности, которую придётся подавлять органами регулирования (ОР) СУЗ.

Таким образом, значительное снижение критической концентрации борной кислоты вплоть до отказа от борного регулирования возможно только при комбинировании всех рассмотренных методов. Часть избыточной реактивности компенсируется твэгами и подвижными вытеснителями, а возникающий положительный выбег регулирующей группой ОР СУЗ с B_4C .

Литература

1. Кускеев И.Ш., Лебедева Е.А., Семишин В.В., Столотнюк Я.Д. Расчетное моделирование нейтронно-физических характеристик активной зоны водо-водяного реактора с изменяемым спектром нейтронов // Журнал Глобальная ядерная безопасность. 2025 год; 15(2) том: с. 46–55.

К.А. Быков, студ.; А.В. Колеганов, асп.;
рук. В.А. Горбунов, д.т.н., проф. (ИГЭУ, Иваново)

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Одними из важнейших с точки зрения безопасности элементов основного оборудования АЭС являются главные циркуляционные насосы (ГЦН). По изменению коэффициента полезного действия (КПД) насоса можно судить об его эффективной эксплуатации.

КПД ГЦН для реакторов ВВЭР-1000 рассчитывается по формуле (1):

$$\eta = \frac{\Delta P \cdot G}{U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}, \quad (1)$$

где ΔP — перепад давления входа и выхода ГЦН; G — расход теплоносителя в петле; U — напряжение на секции; I — ток на электродвигателе; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности насоса ВА3 215/109-6АМ05.

Существует методика оценки состояния ГЦН по амплитуде вибрации [1]. Для анализа необходимо сравнить изменение амплитуд вибрации на электродвигателе (ЭД) и КПД насоса в один промежуток времени. Результаты промышленного эксперимента представлены на рисунке 1.

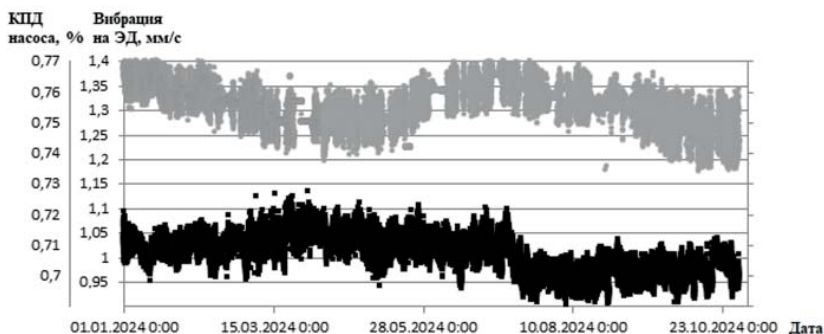


Рис. 1. График изменения амплитуд вибрации на электродвигателе и КПД насоса:
черный — КПД насоса; серый — вибрация на ЭД

Предварительный анализ данных показал, что амплитуда вибрации на ЭД соответствует амплитуде КПД насоса, что говорит о возможности диагностирования ГЦН по предложенной методике, сокращая затраты на анализ работы насоса.

Литература

1. Зарюгин Д.Г. Разработка алгоритмов диагностики состояния ГЦН АЭС с ВВЭР-1000 по данным оперативного технологического контроля: дис. на соиск. учен. степ. к.т.н. по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации». — Обнинск, 2001. — 128 с.

Н.Д. Фоменко, студ.;

рук. Я.В. Чивилев, ст. преп. (НВПИ НИЯУ МИФИ, Нововоронеж)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВАРИАЦИИ GCI С ЧИСЛОМ НУССЕЛЬТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ CFD-РАСЧЕТОВ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В УСЛОВИЯХ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАСТАНИЯ

Пластинчатые теплообменники (ПТО) — важные элементы энергетических систем, требующие точного прогнозирования теплогидравлических характеристик. Спецификой ПТО является сложная геометрия и малый размер каналов между пластинами, а для случая использования ПТО в контуре техводы — обрастание биопленками, что значительно усложняет задачи CFD-моделирования с использованием стандартных методов.

Метод Grid Convergence Index (GCI) представляет собой формальный инструмент для оценки погрешности дискретизации и анализа сходимости решения при измельчении сетки. Отсутствие надежной методологии верификации точности расчетов для ПТО приводит к неопределенности влияния сетки на результаты и субъективности при ее построении.

Для модификации метода в качестве ключевого параметра, характеризующего эффективность теплопереноса в ПТО, рассмотрено число Нуссельта (Nu) — локальный критерий подобия, непосредственно связывающий интенсивность конвективного теплообмена у стенки с теплопроводностью. Индексы GCI (порядка 3% на конечной сетке) вычислялись для трёх сеток последовательного измельчения в комплексе ANSYS CFX [1] на примере двухсекционного аппарата. Значения расчетной сетки были применены при расчете ПТО системы РЦ-6 PGB50 с несколькими каналами в масштабе 1:5 в условиях биологического обрастания.

Коэффициенты теплоотдачи определялись усреднением по массовому расходу в сечении, а теплопроводность воды — по ее зависимости от средней температуры в этом сечении [2]. Режим течения — турбулентный, а скорость на входе намеренно задана выше проектной (5,5 м/с).

Предложенная модификация метода GCI позволила улучшить моделирование качественной картины течения и повысить точность расчетов (температурное распределение и скорости) в 1,24 раза по сравнению с расчетами, где GCI вычислялся по глобальным параметрам.

Литература

1. **А.С. Кравчук.** Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач в пяти частях: Минск, 2013, часть 3, стр. 56–93.
2. **О.Н. Брюханов, С.Н. Шевченко.** Тепломассообмен: Москва, Инфра-М, 2012, стр. 319–336.

*К.Ш. Юзбашиева, студ.;
рук. С.Е. Щеклеин, д.т.н., проф. (УрФУ, Екатеринбург)*

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН ЗАКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ АЭС С РБН

В соответствии с утвержденными Правительством РФ Стратегией развития энергетики и Генеральной схемы размещения энергетических объектов [1,2], планируется ускоренное сооружение АЭС с РБН.

Одним из предлагаемых в указанных документах проектов является замещение двумя блоками БН-1200 Рефтинской ГРЭС. Рефтинская ГРЭС — одна из крупнейших тепловых электростанций России установленной мощностью 3800 МВт. В структуре ГРЭС используются паровые турбины закритических параметров пара типа К-300-240 и К-500-240.

Ключевым решением при ускорении и удешевлении реконструкции данного объекта является максимальное использование действующей инфраструктуры ГРЭС с заменой только котельной части на ядерную паропроизводящую установку (ЯППУ) на базе реактора БН-1200 [3].

Это возможно при повышении параметров генерируемого ЯППУ пара до значений (545–565 °С, 24 МПа) с увеличением принятых в проекте (510 °С, 17 МПа). Также требуется повышение температуры 1 и 2-го натриевых контуров на 35–55 °С и давления 3-го контура с 17 МПа до 24 МПа, что позволит создать АЭС с уровнем КПД более 43%.

Анализ проектных запасов безопасности подтверждает возможность повышения параметров без снижения уровня безопасности реактора.

Основная техническая задача — создание надежного парогенератора (ПГ) «натрий-вода». Решением является применение в конструкции ПГ биметаллических труб. Со стороны натрия используется аустенитная сталь, а со стороны водяного пара — никелевый сплав Cr21Ni32Mo3Nb, обеспечивающий необходимую стойкость к коррозии и прочность [4].

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 г. № 4153-р «О утверждении генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики страны до 2042 года.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 г. № 908-р «О утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года».
3. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А. [и др.], Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие в 2 ч. Ч. 1. — Екатеринбург — УрФУ, 2013. — 548 с.
4. Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов: Сб. статей науч.-техн.конф. «Теплофизика-2011». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2011.

Д.И. Довгий, студ.; рук. И.Л. Ионкин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕАКТОРАМИ ЗА СЧЕТ ВНЕШНЕГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

Повышение эффективности паросиловых энергоблоков тепловых и атомных электростанций на всем протяжении существования «большой энергетики» было и продолжает оставаться одним из самых актуальных вопросов. Главным и наиболее действенным способом увеличения эффективности является повышение начальных параметров термодинамического цикла.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности АЭС является использование гибридных технологий, в частности, перегрев пара выхлопными газами газотурбинных установок (ГТУ) [1]. Это позволяет не только увеличить КПД станции, но и улучшить ее маневренные характеристики.

В данной работе получены результаты расчета комбинированных тепловых схем АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и БРЕСТ-ОД-300 с перегревом пара уходящими газами ГТУ ГТЭ-160. Перегрев пара происходит во внешнем пароперегревателе, охлажденные дымовые газы направляются в газовый подогреватель конденсата (ГПК), где подогревают основной конденсат перед подачей в парогенератор до требуемой температуры.

Для гибридных блоков, состоящих из ГТУ, котла-утилизатора и паротурбинной установки были разработаны математические модели в Excel с использованием библиотеки теплофизических свойств воды и водяного пара CoolProp.

По результатам математического моделирования установлено, что перегрев пара уходящими газами ГТУ с подогревом конденсата в ГПК для водоохлаждаемого и жидкометаллического типов реакторов АЭС от температур 274 и 505°C до 400 и 605°C соответственно приводит к увеличению КПД-нетто гибридной АЭС по сравнению с базовой версией на 7,12% и 4,05% соответственно. При этом электрическая мощность станции возрастает на 1033,74 МВт (106,0%) и 286,48 МВт (96,1%) относительно исходных уровней мощности для рассматриваемых типов АЭС.

Литература

1. Хрусталеv В.А., Наумов А.С. Вопросы комбинирования схем ГТУ и АЭС и их эффективность // Вестник СГТУ. — 2011. — № 3. — С. 54.

Д.С. Николаев, Д.Д. Курицин, Т.Д. Демкина, асп.;
С.М. Дмитриев, д.т.н., проф.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ В ТВЭЛЬНОМ ПУЧКЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА РИТМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГБЛОКА

В рамках разработки модернизированного плавучего энергоблока на базе реакторной установки РИТМ-200С, характеризующейся увеличенными габаритами активной зоны, возникает необходимость верификации расчетных тепло-гидравлических кодов. Усложнение геометрии тепловыделяющих сборок (ТВС) требует получения высокоточных экспериментальных данных о структуре потока теплоносителя для обеспечения обоснования надежности и безопасности проекта.

Исследования проводились на аэродинамическом стенде разомкнутого типа с применением методов теории подобия, моделирующих натурные условия воздушной средой. Использовалась масштабированная (увеличение в 5,79 раз) прозрачная модель фрагмента ТВС, включающая полный комплект имитаторов ТВЭлов, стержней выгорающего поглотителя, центрального вытеснителя и трех дистанционирующих решеток сложной геометрии. Максимальное значение критерия Рейнольдса (Re) в модели составило $0,9 \cdot 10^5$, в штатном объекте — $1,0 \cdot 10^5$.

Для получения экспериментальных данных применялись два взаимодополняющих метода: пневмометрические измерения локальных скоростей потока при помощи трубок Пито-Прандтля, а также визуализации структуры потока методом инъекции контрастной газовой примеси с погрешностью, не превышающей 7,5% и 1,5% соответственно.

Полученные данные являются базой данных для модернизации методики теплогидравлического расчета в коде «КАНАЛ». Рекомендуются увеличение числа типов расчетных ячеек и усовершенствование матрицы перемешивания теплоносителя на основе экспериментально выявленной неоднородности потока. Результаты работы позволяют верифицировать расчетные модели и улучшить обоснование конструктивных решений для перспективных энергоисточников.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

*Д.Д. Курицин, Д.С. Николаев, асп.; А.В. Рязанов, соиск.;
рук. С.М. Дмитриев, д.т.н., проф.
(НГТУ им Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ МЕЖБЛОЧНОГО ЗАЗОРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВТГР

Обеспечение надежного охлаждения активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) требует детального исследования гидравлических характеристик графитовой кладки, в том числе влияния межблочных зазоров на распределение потоков теплоносителя [1].

С этой целью, авторами были выполнены экспериментальные исследования на полномасштабной модели фрагмента графитовой кладки, включающей части трёх смежных топливных колонн и воспроизводящей межблочные зазоры между ними. В качестве рабочей среды использовался воздух при нормальных условиях. Расход подбирался по критерию подобия Рейнольдса, обеспечивающему соответствие режиму нормальной эксплуатации реактора. Измерения расходов в каналах и зазорах проводились с помощью пневмометрических элементов собственной разработки, прошедших предварительную тарировку. Суммарная погрешность измерений не превышала $\pm 4\%$.

В результате было получено, что при проектном значении ширины межблочного зазора 2 мм доля расхода через зазоры составила $(2,7 \pm 0,2)\%$ от суммарного расхода через модель. Уменьшение зазора до 1 мм приводит к снижению доли байпасного потока до $(0,84 \pm 0,15)\%$, а увеличение до 4 мм — к росту до $(7,1 \pm 0,5)\%$.

Таким образом, установлено, что ширина межблочного зазора напрямую влияет на распределение расхода между каналами охлаждения и зазорами, что может снижать эффективность теплоотвода из активной зоны и приводить к формированию локальных зон перегрева. Полученные данные могут быть использованы при уточнении расчетных методик и верификации теплогидравлических кодов для реакторов типа ВТГР.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Литература

1. Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Дмитриев С.М. и др. Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х т. Под общей ред. Н.Н. Пономарева-Степного. Нижний Новгород, Нижегородский гос. техн. ун-т, 2018.

*Д.С. Соколов, студ.; Д.Д. Курицин,
Д.С. Николаев, Т.Д. Демкина, асп.;
рук. Д.Н. Солнцев, к.т.н., доцент
(НГТУ им Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО СТЕРЖНЯ НА ГИДРОДИНАМИКУ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВТГР

При обосновании безопасности активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) критически важным является анализ потенциальных рисков, связанных с изменением гидравлических характеристик канала для поглощающего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ) при перемещении в нем рабочего органа. Одним из таких рисков является возможное перераспределение потоков теплоносителя из каналов топливной сборки в зазоры графитовой кладки, что может привести к снижению эффективности охлаждения топливных элементов.

Для решения данной задачи были проведены экспериментальные исследования гидродинамики активной зоны реактора с целью определения гидравлических характеристик канала ПС СУЗ. Эксперименты проводились на масштабной модели, уменьшенной в 2,6 раза по сравнению со штатной геометрией канала. Течение гелиевого теплоносителя моделировалось водой с учетом теории гидродинамического подобия. Измерения проводились при трех положениях поглощающего стержня в диапазоне чисел Рейнольдса от 17000 до 36000, соответствующих режимным параметрам работы реактора.

Установлено, что изменение положения стержня оказывает незначительное влияние на гидравлическое сопротивление канала. Различие коэффициентов сопротивления между крайними положениями стержня не превышает 3,5%. Основные потери давления сосредоточены в дросселирующем устройстве, что минимизирует влияние пространственного положения рабочего органа в канале ПС СУЗ. Были получены значения коэффициентов гидравлического сопротивления. Погрешность измерений составила менее 4%.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Литература

1. Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Дмитриев С.М. и др. Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х т. Под общей ред. Н.Н. Пономарева-Степного. Нижний Новгород, Нижегородский гос. техн. ун-т, 2018.

С.Ю. Воробьева, асп.;
рук. С.О. Иванов, к.т.н., доц.,
Ю.Б. Воробьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD-КОДОВ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА РАДИОЛИТИЧЕСКОГО ВОДОРОДА В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР

В оборудовании первого контура реакторных установок типа ВВЭР вследствие процесса радиолитического распада теплоносителя в стояночном режиме в парогазовых объемах оборудования первого контура могут образовываться взрывоопасные водородо-содержащие смеси.

Расчеты проводились с использованием кодов вычислительной гидродинамики (CFD) — Star CCM+, Ansys CFX. Для модели реактора (кол-во ячеек сетки для трех сеток составило 23604, 1725376 и 3133416 элементов) в объеме ниже уровня теплоносителя был проведен расчет коэффициента массоотдачи через межфазную поверхность [1]. По методу GCI была проведена оценка точности и определен оптимальный размер расчетной сетки.

На основе полученного значения коэффициента массоотдачи для парогазовых объемов реактора было определено время образования взрывоопасной смеси, а также выявлены основные места накопления водорода и кислорода — у средней плиты блока защитных труб (БЗТ) и под крышкой реактора соответственно. Также была замечена тенденция к равномерному распределению водорода по объемам со временем (для задачи реактора — порядка 5000 с) — это даст возможность в дальнейшем связать CFD-расчеты с одномерным кодом, что значительно сократит затрачиваемые временные и мощностные ресурсы.

Для продолжительных расчетов с использованием параметров (температуры, давление и т.п.), определяемых регламентом процедур планово-предупредительных ремонтов на АЭС, необходима модель сложной зависимости показателя массоотдачи от динамики граничных условий, которая позволит сократить затрачиваемые на расчет временные и мощностные ресурсы. Инструментом для создания такой модели может послужить нейронная сеть. В результате проводимых работ была создана база данных для настройки нейронной сети для модели реактора. Также в докладе предложен новый метод верификации полученных с помощью нейронной сети значений.

Литература

1. **H. Herlina, J.G. Wissink.** Direct numerical simulation of turbulent scalar transport across a flat surface. *J. Fluid Mech.*, 2014, vol 744, стр. 217–249.

Е.О. Бабкин, студ.; рук. В.И. Мелихов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТЕНДЕ ПГВ КОДОМ STEG-IATE

Представлены результаты валидации кода STEG-IATE на экспериментальных данных по значениям паросодержания и перепадов давлений на ПДЛ, полученных на стенде ПГВ [1].

Экспериментальная модель представляет собой поперечную «вырезку» натурального парогенератора ПГВ-1500, размещенную вдоль горизонтальной оси сосуда высокого давления диаметром 1670 мм. Длина нижней части модели 2450 мм, ширина модели 100 мм. Вертикальные размеры модели приняты равными натурным [1]. На стенде установлены отборы давления для измерения перепада давления на ПДЛ и объёмного паросодержания.

На рисунке 1 приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

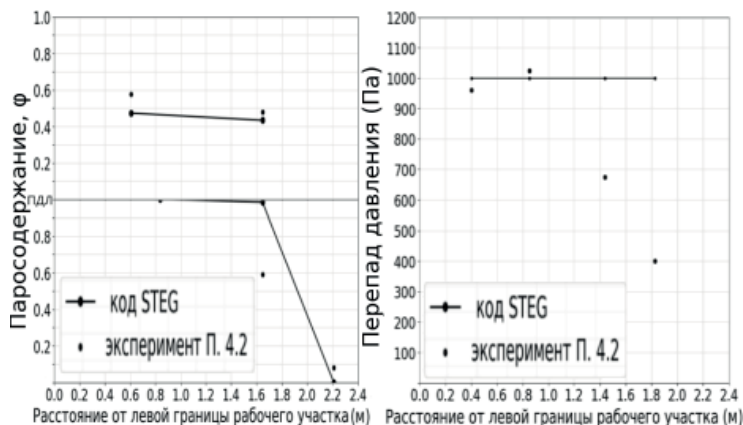


Рис. 1. Сравнение результатов расчёта паросодержания (слева) и перепада давления на ПДЛ (справа) с экспериментальными данными [1]

Как видно из данных на рисунке 1, результаты расчёта над ПДЛ удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными и относительная погрешность не превышает 25%.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и применение программного продукта для моделирования теплогидравлических процессов в парогенераторе для АЭС с ВВЭР» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ле Т.Т. Экспериментально-расчетные исследования гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе. НИУ «МЭИ», 2021. — 270 с.

Р.П. Демьяненко, Е.О. Бандалак, студ.;
рук. В.А. Горбунов, д.т.н., проф. (ИГЭУ, Иваново)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ UO₂ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ У ТВЭЛОВ С ОТВЕРСТИЕМ

Обычно на вычисление температурных полей с учетом лучистого теплообмена в COMSOL Multiphysics уходит большое количество времени, которое можно сократить, используя понятие приведенного коэффициента теплопроводности.

Приведенный коэффициент теплопроводности учитывает лучистую, конвективную и кондуктивную составляющие теплообмена в пористых телах, что позволяет решать сложные задачи быстрой (например, с группой ТВЭЛов). Данный коэффициент можно получить на основе решения обратной задачи теплопроводности.

Рассмотрим вариант расчета ТВЭЛа, состоящего из уранового стержня диаметром 7,6 мм. В данной задаче мощность внутреннего источника энергии в стержне будет постепенно увеличиваться до тех пор, пока не достигнет значений, при которых температура будет равна температуре разрушения стержня.

Для сравнения рассмотрим аналогичный ТВЭЛ, но с центральным сквозным отверстием диаметром 2,3 мм, заполненным гелием. Предварительные расчеты показали, что конвективная составляющая внутри отверстия не будет оказывать значительного влияния на результаты, поэтому в дальнейших расчетах учитываться она не будет. Получается, что в отверстии будет учитываться теплообмен излучением прозрачного тела, в данном случае двухатомного газа (гелия).

Обе задачи решались в 3D постановке с коэффициентом теплоотдачи на внешней оболочке ТВЭЛа, равной $30\,000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

В результате решения обратной задачи получили, что приведенный коэффициент больше среднего за счет появления лучистого теплообмена в отверстии. Расчеты показали, что ТВЭЛ с отверстием, в сравнении с ТВЭЛом без отверстия, работает более надежно.

Литература

1. **Горбунов В.А.** Моделирование теплогидравлических процессов в ядерных реакторах в Comsol multiphysics: Учеб. пособие / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет». — Иваново, 2019. — 180 с.
2. **Теплякова С.С.** Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС [Электронный ресурс]. URL:<https://www.ntnu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2024/03/048-061.pdf>

В.А. Черкасов, студ.;
рук. М.М. Каверзнев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АСММ В ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Способом повышения конкурентоспособности атомных станций малой мощности (АСММ) является их использование в составе гибридных энерготехнологических комплексов (производство электроэнергии, тепла, водорода, опреснение, добыча полезных ископаемых из морской воды в различных сочетаниях).

Так, плавучий комплекс (Offshore Floating Nuclear Plant) позволяет производить до 150 000 т/год «зеленого» водорода [1] при себестоимости, обеспечивающей конкурентоспособность с традиционным топливом (ниже 2 \$/кг) [2]. В другом варианте, использование АСММ позволяет, помимо электроэнергии, получить до 30 000 м³/сутки при цене 1,04 \$/м³, используя при этом образующиеся рассолы для добычи полезных элементов, исключая невыгодное маневрирование мощностью и улучшая окупаемость [4].

Оба рассмотренных решения не показали бы такой эффективности без инновационных решений. В случае [1] это использование высокотемпературного электролиза (до 950°C, КПД преобразования ядерной энергии в водород ~50%). В случае [3] — использование компактных ядерных энергомодулей (т.н. «схема Виноградова»; мощность 125 МВт(т) и 32 МВт(э) в габаритах: диаметр 4,3×18,7 м).

По оценкам автора, эти результаты сохраняют свою актуальность, несмотря на изменения экономических условий.

Литература

1. **Buongiorn, J.** The Offshore Floating Nuclear Plant Concept / J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas // Nuclear Technology. — 2016. — Vol. 194, № 1. — P. 1–14.
2. Hydrogen Production and Uses // World Nuclear Association. — 2024. — URL: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses> (дата обращения: 18.11.2025).
3. **V.V. Romanov**, et al. Estimates of the Modular Underwater SNPP Option. // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479801.
4. **Кобец Д.В.** Технико-экономическая оценка вариантов опреснительного комплекса на базе модульной мини-АЭС. // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. Тезисы докладов XVIII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Москва, 2022. — 998 с. — с. 600.

Ю.О. Шапошникова, студ.;
рук. Ю.Б. Воробьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОНВЕКЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛАХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГИДРОИСПЫТАНИЙ

В верхних частях чехлов приводов СУЗ реакторов ВВЭР при снижении давления во время гидроиспытаний возможно выделение газовой фазы и образование парогазовых полостей. Это связано с падением растворимости продуктов радиолиза теплоносителя (H_2 , O_2), образующихся под воздействием ионизирующего излучения [1], что создает риск образования взрывоопасных смесей.

Методологической основой работы является CFD-моделирование в программном комплексе ANSYS CFX. На подготовительном этапе в препроцессоре GAMBIT была построена трехмерная геометрическая модель расчетной области, включающей защитные трубы СУЗ с кольцевыми зазорами между штангами приводов и внутренней поверхностью труб, и выполнена ее дискретизация расчетной сеткой с локальным сгущением в областях потенциального застоя теплоносителя. Для последующего моделирования процессов массопереноса планируется использовать модель турбулентности и многокомпонентную модель переноса с учетом источников водорода, поступающего с поверхности теплоносителя.

На основе анализа этих данных планируется идентифицировать застойные зоны и области преимущественной аккумуляции газов, определить коэффициент массопередачи и оценить время достижения критических концентраций водорода в различных частях оборудования СУЗ. Ожидается, что полученные результаты позволят количественно обосновать необходимую периодичность продувки оборудования и разработать практические рекомендации по модернизации процедур проведения гидроиспытаний для исключения риска образования взрывоопасных концентраций газов. Проведенная работа создает основу для последующего детального анализа рисков и оптимизации эксплуатационных режимов оборудования СУЗ ВВЭР-1000 с позиции водородной безопасности.

Литература

1. Архипов О.П., Верховская А.О., Кабакчи С.А., Ермаков А.Н. Разработка и верификация математической модели радиолиза водяного пара // Атомная энергия. 2007. Т. 103. № 5. С. 299–302.

Д.А. Сачков, студ.;
рук. М.М. Каверзнев, к.т.н., доц. (МЭИ, Москва)

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГЕНЕРАТОРОВ РУ ТИПА ВВЭР/PWR

Парогенераторы (ПГ) реакторных установок (РУ) являются критически важными элементами оборудования атомных электростанций (АЭС), в связи с чем сравнение технических показателей ПГ представляет практический интерес при разработке проектов АЭС.

В рамках работы разработана методика сравнительной количественной оценки ПГ на основе критериев [1] с последующим определением весовых коэффициентов для каждого критерия и получением единого интегрального показателя. На основе данной методики проведена сравнительная оценка ПГ различных моделей.

Определение весовых коэффициентов реализовано методом линейного ранжирования по формуле Фишберна [2].

В работе произведен расчет весовых показателей для каждого технического параметра. Например, для эксергетического КПД — 0,133 (самое большое значение), для критерия Глазера для 2 контура — 0,010 (самое маленькое значение).

Алгоритм оценки и ранжирования был реализован в виде приложения на языке Python. Был рассмотрен оригинальный вертикальный ПГ, предложенной ранее на кафедре АЭС МЭИ и рассчитанный автором [3].

Марка ПГ	Баллы	Марка ПГ	Баллы
ПГВ-440	27,59	Усовершен. верт. ПГ	48,65
ПГВ-1000	45,90	АР-1000	50,38
ПГВ-1000 МКО	48	SNP-140	67,92

Как видно из таблицы, горизонтальные ПГ первых РУ ВВЭР заметно отставали от ПГ других типов, однако по мере совершенствования разрыв значительно сократился и находится в пределах погрешности методики.

Предложенная методика проста, но несовершенна, поскольку в нее не включены аспекты эксплуатации, что является задачей ее дальнейшего развития.

Литература

1. **Бажан П.И.** Справочник по теплообменным аппаратам М: Машиностроение, 1989. — 59 с.
2. **Спиридонов С.Б.** Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // НАУКОВЕДЕНИЕ. 2017. Т. 9. № 6. — 24 с.
3. **Сачков Д.А.** Усовершенствованный вертикальный ПГ для РУ ВВЭР-С в двухпетлевой компоновке. — Вып. работа бакалавра М: МЭИ, 2025. — 104 с.

А.С. Никулин, асп.; рук. В.И. Мелихов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВАЛИДАЦИЯ КОДА STEG-IATE НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПГВ-1000

В данной работе представлены результаты валидации кода STEG-IATE с моделью переноса площади межфазной поверхности с целью улучшения описания межфазных взаимодействий. Для проведения валидации теплогидравлического кода были выбраны данные по значениям уровнемеров в различных точках ПГВ-1000 в зависимости от уровня мощности реакторной установки (РУ), представленных в работе [1].

Далее произведено исследования теплогидравлических процессов в ПГ на четырёх уровнях мощности РУ: 100, 75, 50 и 25% Нном. На рисунке 1 приведён сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными с учётом погрешности датчиков уровня.

Как видно из данных на рисунке 1 результаты расчёта согласуются с экспериментальными данными, однако на 100% Нном результаты расчета несколько завышают значение массового уровня в горячем торце. Стоит отметить, что массовый уровень в холодном торце остаётся практически неизменным с увеличением мощности, в то время как в центре ПГ с увеличением мощности уровень значительно возрастает.

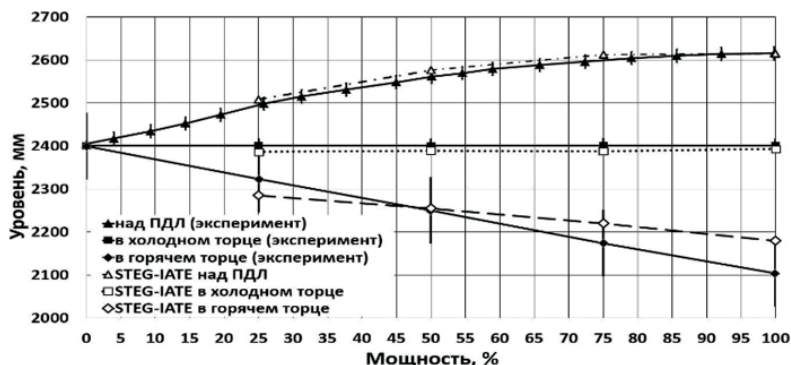


Рис. 1. Сравнение результатов расчёта массового уровня на различных уровнях мощности РУ с экспериментальными данными [1]

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и применение программного продукта для моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе для АЭС с ВВЭР» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и тепло-химические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2001. — 316 с.

Д.А. Макаров, асп.; рук. А.Н. Байрамов, д.т.н., проф.
(СГТУ имени Ю.А. Гагарина, Саратов)

ОЦЕНКА КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ В СИСТЕМУ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДНОГО КОМПЛЕКСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ С АЭС

Водородный комплекс на основе процесса электролиза воды высокого давления в комбинировании с АЭС [1, 2] позволяет обеспечить базисную нагрузку станции в условиях регулирования суточной неравномерности электрической нагрузки. Выполнена оценка капиталовложений в систему хранения газов водородного комплекса при комбинировании с АЭС с ВВЭР-1200 в диапазоне давлений 10...80 МПа, выявлен оптимум давления аккумулирования 30 МПа. Получена средняя стоимость емкостной системы хранения водорода и кислорода при среднем объеме, стоимости и количестве емкостей с учетом различных материалов их изготовления (рис. 1).

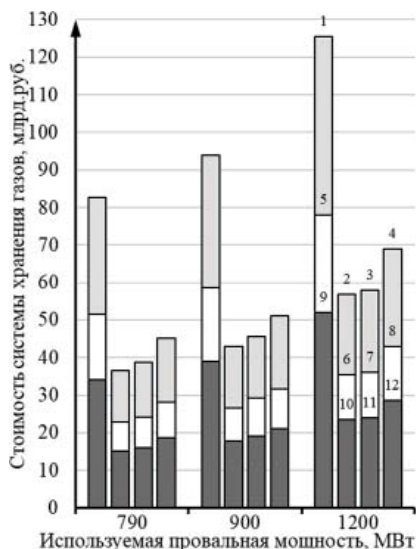


Рис. 1. Средняя стоимость системы хранения: 1, 2, 3, 4–10, 30, 50, 80 МПа соответственно для материала ВТ6; 5, 6, 7, 8 — то же, для 08Х18Н10Т; 9, 10, 11, 12 — то же, для углеродного композита; обозначения столбцов соответствуют приведенным значениям провальной мощности

Литература

1. Пат. № 2821330 Российская Федерация, МПК G21D 1/00 (2006.01). Водородный комплекс на основе электролиза воды высокого давления для комбинирования с атомной станцией/ заявители и патентообладатели Байрамов А.Н., Макаров Д.А. № 2023115369; заявл. 09.06.2023; опубл. 21.06.2024 Бюл. № 18.
2. Байрамов А.Н., Макаров Д.А. Разработка и обоснование нового принципа комбинирования АЭС с водородным комплексом // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 05(422) 2024, с. 30–50.

К.В. Кириллов, П.В. Ахметова, В.В. Семишин, соиск.;
рук. Я.Д. Столотнюк, доц., к.т.н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

РАСЧЁТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ ТВС С УРАНОВЫМ И СМЕШАННЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ С ВЫГОРАЮЩИМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ

Выполнены нейтронно-физические расчёты ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом по программам САПФИР_95 и САПФИР_РФ на основе бенчмарка, опубликованного в 2002 г. [1]. В обеих моделях ТВС геометрия, материальный состав и расположение по кассете тепловыделяющих элементов с добавлением гадолиния (твэгов) идентичны. По результатам моделирования были получены зависимости размножающих свойств бесконечной среды от глубины выгорания для систем с различной жёсткостью спектра.

В работе были рассчитаны модели с различным количеством слоёв радиального разбиения материала выгорающего поглотителя. Для систем с различной жёсткостью спектра было получено радиальное распределение относительной плотности потоков нейтронов из быстрой и тепловой групп по слоям разбиения твэгов, оболочки и ближайших слоёв теплоносителя в зависимости от глубины выгорания ТВС.

По результатам моделирования максимальные отклонения значения размножающих свойств бесконечной среды соответственно составили: с урановым топливом 0,78% и 1,04%, со смешанным уран-плутониевым топливом 0,9% и 1,41%. При моделировании твэгов в системах с жёсткостью спектра ($\Phi_b/\Phi_t=4\div 8$) и размерами твэга 1,5 от длины свободного пробега тепловых нейтронов рекомендуется разбивать материал твэга на 4÷8 слоев. Для систем с более жёстким спектром при размерах твэга 1,2 от длины свободного пробега тепловых нейтронов необходимое количество слоёв радиального разбиения равняется 2÷4.

Литература

1. NEA/NSC/DOC. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Nuclear Energy Agency, 2002. — 156 p.

*Е.С. Сарычев, асп. (НИУ МЭИ), м.н.с.
(НИЦ «Курчатовский институт»);
рук. В.И. Мелихов, д.т.н., проф. (НИУ МЭИ)*

ВАЛИДАЦИЯ КОДА МАВР-ТА НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ STORM ПО ПЕРЕНОСУ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

Повторное взвешивание (ПВ) осевших аэрозолей продуктов деления является важным фактором, определяющим источник радиоактивности в защитной оболочке АЭС в условиях тяжёлой аварии [1]. В данной работе выполнена валидация модели ПВ, основанной на модели баланса сил и реализованной в коде МАВР-ТА [2], на серии экспериментов STORM (SR09, SR10, SR11) [3]. Выполнены вариантные расчёты с использованием модели баланса сил и с заданием постоянной скоростью ПВ. На основе проведённого анализа разработана модифицированная модель, устраняющая выявленные недостатки. На рисунках 1 и 2 представлены результаты моделирования эксперимента SR11 взвешенной фракции аэрозоля с поверхности установки, полученные методом баланса сил и модифицированной моделью.

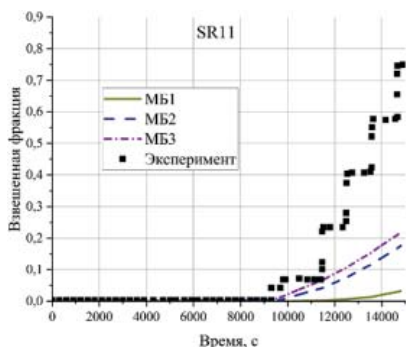


Рис. 1. Взвешенная фракция, рассчитанная методом баланса сил

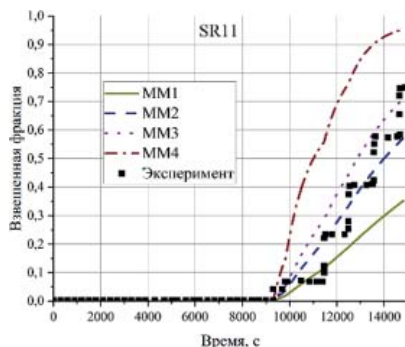


Рис. 2. Взвешенная фракция, рассчитанная модифицированной моделью

Литература

1. Stempniewicz M.M., Komen E.M.J., De With A. Model of particle resuspension in turbulent flows. // Nuclear Engineering and Design, 2008, V. 238, № 11, p. 2943–2959.
2. Shmelkov Yu.B., Zvonarev Yu.A., Shutov N.V., Petrov L.V. Development and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a VVER NPP. Part 2 — Modelling of the fission products transport in the primary circuit and inside the containment // Nuclear Engineering and Design. 2021. V. 382, 111377.
3. Bujan A., Ammirabile L., Bieliauskas A., Toth B. ASTEC V1.3 code SOPHAEROS module validation using the STORM experiments. // Progress in Nuclear Energy, 2010, vol. 52, № 8, p. 777–788.

*Е.С. Шевелев, асп.; В.В. Семишин, соиск.;
рук. О.Ю. Кавун, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

УПРАВЛЕНИЕ ВЫГОРАНИЕМ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Потенциальные площадки размещения атомных станций малой мощности (АСММ) характеризуются удаленностью и ограниченной обслуживаемостью. Следствием этого являются требования к повышенной длительности топливной кампании (~10 лет). Активные зоны реакторов АСММ имеют большие избыточные запасы реактивности на выгорание топлива. В разрабатываемых ранее подобных ядерных реакторах не предусматривалась большая длительность кампании и, соответственно, компенсация высоких запасов реактивности.

В современных проектах АСММ для компенсации избыточной реактивности рассматриваются исключительно подвижные поглотители. Применение такого способа может привести к сильной неравномерности полей энерговыделения, локальным перегревам и, как следствие, неравномерному выгоранию топлива и уменьшению длительности топливной кампании. Для поддержания требуемой кампании необходима специальная система управления подвижными поглотителями. Её задачей является поддержание неравномерности энерговыделения в установленных пределах.

Разработана связанная нейтронно-физическая и теплогидравлическая модель активной зоны [1] реактора АСММ с применением программных средств Десна-7Т (активная зона), ТРР (горячий канал), МВТУ 3.5 (автоматика и визуализация результатов расчетов). Предложен алгоритм взаимного перемещения групп органов регулирования. Произведены расчёты, демонстрирующие возможность обеспечения требуемой неравномерности энерговыделения с $K_r \leq 1,2$. Моделирование выгорания демонстрирует важность контроля полей энерговыделения.

Литература

1. **Шевелев Е.С.**, Использование программных средств сапфир-РФ, десна-7 и ТРР для расчетов активной зоны реактора шельф / Е.С. Шевелев, В.В. Семишин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. — Москва: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2025. — С. 846. — EDN NBMPID.

Н.Д. Гембицкий, асп.;
рук. В.И. Мелихов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»),
К.С. Долганов, д.т.н. (ИБРАЭ РАН, Москва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ ПЫЛИ ПРИ БАРБОТАЖЕ ГАЗА В АВАРИИ С ДВУСТОРОННИМ РАЗРЫВОМ КОНТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ ДИВЕРТОРА ИТЭР

В ходе аварий с истечением теплоносителя в вакуумную камеру (ВК) термоядерных установок (ТЯУ) типа токамак возможно взвешивание активированной металлической пыли, образующейся в ходе эксплуатации установки, с обращенных к плазме поверхностей. Для расчетной оценки последующего выброса радиоактивности в окружающую среду необходимо моделирование процессов, определяющих взвешивание, перенос и осаждение металлической пыли [1].

В авариях с множественным разрывом охлаждающих трубок первой стенки или дивертора ИТЭР проектом предусмотрен сброс парогазовой смеси из ВК в бак-барботер системы снижения давления в ВК. Соответственно, оценка атмосферного выброса активированной пыли через систему вентилирования требует моделирования осаждения частиц при барботаже несущей парогазовой смеси.

В данной работе представлены результаты демонстрационного расчета аварии с двусторонним разрывом контура охлаждения дивертора на установке ИТЭР с помощью интегрального кода ФАЭТОН, разрабатываемого в ИБРАЭ РАН. В расчете использовалась модель осаждения пыли при барботаже, ранее разработанная для моделирования скруббирования аэрозолей в воде при тяжёлых авариях на АЭС [2].

Показано, что 83,1% от взвешенной массы бериллиевой пыли попадает в бак-барботер, где 99,6% массы осаждается в воде при барботаже парогазовой смеси. Отмечено качественное соответствие изменения скорости осаждения массы пыли в воде ожидаемой динамике при различных расходах сбрасываемого в воду газа и различных режимах инжекции (пузырьковом или струйном).

Таким образом, продемонстрирована существенная роль барботажа в ограничении радиоактивного выброса при авариях на ТЯУ типа токамак и необходимость развития соответствующих физических моделей.

Литература

1. **Preliminary Safety Report (RPrS)**. English Translation of the Rapport Préliminaire de Sûreté (RPrS) submitted to the French Nuclear Safety Authorities, ver. 1.0, 19 Nov. 2010. — 2048 p.
2. **Гембицкий Н.Д.** Модель фильтрации аэрозолей при барботаже парогазовой смеси в широком диапазоне условий: магистерская диссертация. — М.: МФТИ, 2024. — 75 с.

*Е.И. Орельяна Урсуа, студ.;
рук. М.М. Каверзнев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МЮОННОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

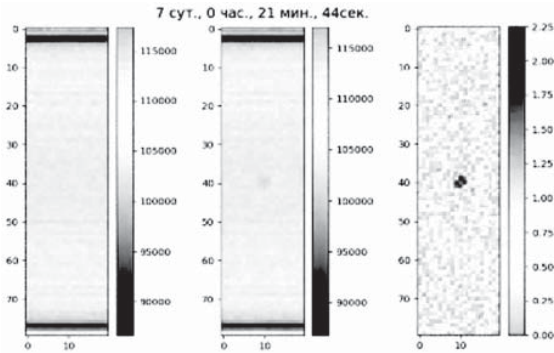


Рис. 1. Результаты 7 дней экспозиции, слева направо: мюнограммы ПГ без и с отложениями, разностная картина

блоков АЭС. Метод оказался единственным применимым для диагностики реакторов АЭС Фукусима и активно развивается в т.ч. в РФ [1].

Ранее высказывалась гипотеза о возможности применения МТ для мониторинга состояния трубки парогенератора (ПГ) АЭС [2]. В данной работе выполнено расчетное моделирование в подтверждение такой возможности. Предполагалось наличие сферического отложения диаметром 20 см в межтрубном пространстве ПГ ПГВ-1000. Моделируемый детектор имел размеры 5×1 м (имеет размер ячеек 5×5 см) и размещался горизонтально под ПГ. Рассматривался поток мюонов, проходящий сверху через гермооболочку в круговом секторе ± 20 град. Для моделирования была написана программа на языке Python.

Согласно полученным результатам, образец отложений гарантированно обнаруживался и локализовывался за время около 14 суток, причем с достаточной вероятностью предположить наличие отложений можно было уже за 7 суток мониторинга (рис. 1.).

Литература

1. **Yashin I.I., at all.** Muon Tomography of Large-Scale Objects // *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, Vol. 84, No. 6, pp. 1171–1181. DOI: 10.1134/S1063778821130421
2. **Кузнецова П.А.** Оценки применимости мюнографии для мониторинга оборудования АЭС // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов XXIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов.* — Москва, 2023. — С. 737. — EDN HXOEWU.

Я.А. Горбунова, асп.;

рук. В.Д. Локтионов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», АО «ЭНИЦ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦАХ ВЕРХНЕГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВАННЕ РАСПЛАВА КОРИУМА НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА КОРПУС ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ТЯЖЁЛОЙ АВАРИИ

Представлен сравнительный анализ результатов расчета теплового состояния двухслойной стратифицированной ванны расплава кориума в реакторной установке ВВЭР-1000 в условиях тяжелой аварии (ТА), выполненный с использованием модифицированных [1, 2] и известных [3] соотношений для чисел Нуссельта. Расчеты проведены с помощью разработанной автором программой “POOL_Q-3”. Исследовалось влияние двух параметров: площади поверхности «зеркала» расплава и температуры на боковой поверхности металлического слоя на величину тепловой нагрузки, действующей на корпус реактора в области металлического слоя.

Анализ результатов показал, что двукратное увеличение площади поверхности зеркала расплава приводит к незначительному снижению тепловой нагрузки на боковую поверхность слоя стали на ~0,8%. В то же время, увеличение температуры на боковой границе металлического слоя обусловило значительное, на ~7,5%, снижение тепловой нагрузки. Данное явление сопровождается увеличением остаточной толщины стенки корпуса более чем на 60%.

Используемый подход, основанный на применении модифицированных соотношений для чисел Нуссельта [1,2], подтвердил свою чувствительность к изменению граничных условий. Результаты работы формируют аналитическую основу для стратегий управления ТА с целью сохранения корпуса реактора.

Литература

1. **Loktionov, V., 2024.** “Modified correlations for the Nusselt numbers at the boundaries of a bottom-heated molten metal layer in a stratified corium melt pool and an assessment of heat transfer conditions during a severe accident”. Nuclear Engineering and Design. No. 112760. (2024). p. 12–13.
2. **В.Д. Локтионов** Модифицированное соотношение для чисел Нуссельта на боковой поверхности плоского металлического слоя расплава, нагреваемого снизу/ Теплоэнергетика, № 12, 2023. — с. 65–76.
3. **Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996.** In-vessel Coolability and Retention of a Core Melt. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1. p. 441.

*Т.К. Магницкий, студ.;
рук. Ю.Б. Воробьёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КРОССВАЛИДАЦИЯ РАСЧЁТНОГО CFD-КОДА ЛОГОС АЭРО-ГИДРО

ЛОГОС Аэро-Гидро [1] предназначен для решения задач, связанных с течением жидкостей и газов, а также многофазными и реагирующими потоками. Он использует широкий спектр математических моделей и алгоритмов, что позволяет эффективно моделировать как стационарные, так и нестационарные течения. Вычисления проводятся с помощью метода конечных объёмов.

Основная цель данной работы провести кросс-валидацию CFD-кода ЛОГОС, сравнивая результаты расчётов с CFD-кодом Ansys Fluent. В результате кросс-валидации тестируется не только работа решателя, но и генератора сеток. Расчёты проводятся с использованием тетраэдральной и многогранной сеток.

Первая расчётная модель — это поворотный участок ГЦТ ВВЭР-1000. Эта модель позволяет нам оценить качество расчета вихревых структур после поворота ГЦТ. Вторая модель — это кассета ПГ ЯЭУ РИТМ-200, позволяет смоделировать многофазные течения через пористые участки, имитирующие трубчатку ПГ, а также определить зоны накопления газа. Стоит отметить, что для подготовки модели на ЛОГОС использовался внутренний сеточный генератор и редактор геометрии. Таким образом удалось провести расчёты используя практически полностью отечественные программные компоненты и сравнить результаты с зарубежными аналогами.

Таким образом, в результате кросс-валидации было определено, что ЛОГОС способен рассчитывать сложные вихревые структуры, но при этом качество разрешения вихрей несколько хуже, чем во Fluent. В многофазной модели ПГ и Fluent, и ЛОГОС определили одну и ту же зону накопления газовой фазы. Это может говорить о корректности расчётов.

Литература

1. **Руководство пользователя ЛОГОС 5.3.21.**

Н.М. Хвостов, студ.; рук. Д.М. Марков (АО «Прорыв», Москва)

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО 4D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СООРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПН «ПРОРЫВ»

На текущий момент 4D-моделирование применяется при выполнении широкого спектра задач. Непосредственно в атомной отрасли используется для организации вывода энергоблоков из эксплуатации [1] и строительстве нетиповых объектов [2]. ПН «Прорыв» — ключевой инновационный проект Госкорпорации «Росатом». В его реализации участвуют десятки организаций, как следствие, использование разрозненных инструментов проектирования и моделирования с учетом большого объема НИОКР создает сложности в координации и интеграции работ. Для упрощения решения данной проблемы созданы цифровые двойники (ЦД) объектов ПН. В состав ЦД входят 4D-модели процессов обращения с оборудованием объектов ПН. Целью разработки таких моделей является проверка операций доставки, монтажа и ремонта оборудования на выполнимость.

Что важно для современных цифровых решений в промышленности, аппаратные средства, применяемые для разработки 4D-моделей, отличаются от типовых офисных АРМ только мощными видеокартами, удовлетворяющими требованиям САПР (в АО «Прорыв» используется продукт «3D-EXPERIENCE», время обучения прикладному которому составляет около двух недель, а стоимость — около 10 млн. руб. в год за одно рабочее место). Проблемой в этом вопросе остается только сохраняющаяся зависимость от импорта — современных отечественных решений в области данного ПО нет.

Настоящая технология показала высокую эффективность, выявив и предотвратив более 100 пространственно-временных коллизий, среди которых есть незначительные — нехватка длины хода привода на участке прессования, и серьезные, такие как невозможность монтажа смешивающего подогревателя воды одним из рассматриваемых вариантов. Несмотря на то, что осмечиванию невыполненные работы не подлежат, приблизительно экономия от использования 4D-моделей оценивается в суммы порядка сотен тысяч и миллионов рублей за исключенную ошибку.

Литература

1. Тихоновский В.Л., Былкин Е.К. Место и роль информационных технологий при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. № 4. С. 113–119.
2. Кононов В.В., Тихоновский В.Л., Гуралев С.С., Бычкова И.А., Уткин С.С., Свистельман В.С. Возможности технологии «цифровой двойник» для подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (10). С. 99–108. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-99-108.

Е.В. Становов, асп.;
рук. О.И. Мелихов, д.ф-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ АЭС С ВВЭР, ПОЗВОЛЯЮЩАЯ РАСШИРИТЬ ДИАПАЗОН МАНЕВРИРОВАНИЯ

Частота переменного тока в электрической сети и напряжения в узлах являются важнейшими показателями качества электроэнергии. Общим для этих показателей является то, что они оба связаны с балансами мощностей в электроэнергетической системе и системах электроснабжения потребителей.

Значение частоты в любой момент нормального режима одинаково во всех узлах электрической сети и является единым показателем качества электроэнергии. В то же время уровни напряжений в различных точках сети могут различаться очень сильно и одновременно в одних узлах сетей соответствовать, а в других не соответствовать требованиям ГОСТов. В этом смысле напряжение, как параметр качества электроэнергии, должно анализироваться в каждом отдельном узле энергосистемы на шинах каждого потребителя [1].

В работе показаны пути маневрирования и частотного регулирования АЭС с учетом российской и мировой практики и требований нормативных документов. Рассмотрены возможности повышения маневренности АЭС в России и за рубежом. Проанализированы основные требования к маневренности отдельных контуров АЭС как способа повышения маневренности второго контура. Показана роль переходных режимов работы АЭС с реакторами типа ВВЭР, позволяющая расширить диапазон маневрирования АЭС. Выполнен анализ влияния системных аварий и системных отклонений на пределы маневренности.

Литература

1. **С.С. Ананичева, А.А. Алексеев, А.Л. Мызин.** Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие. Екатеринбург, 2012. — 94 с.

А.Д. Муратова, студ.;
рук. М.М. Каверзнев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ НКРТ В ТЕПЛОВЫХ ЦИКЛАХ АЭС

В условиях роста требований к безопасности, экологичности и эффективности атомных энергетических установок большое внимание уделяется поиску альтернативных рабочих тел для тепловых циклов. Одним из перспективных направлений является использование низкокипящих рабочих тел (НКРТ), таких как гидрофторуглероды (R-134a, R-245fa), углеводороды (R-290, R-600a) и природные хладагенты (аммиак, R-717, CO₂, R-744). Применение НКРТ особенно актуально для малых и средних АЭС, а также в системах органического цикла Ренкина (ORC), позволяющих эффективно утилизировать низкопотенциальное тепло [1].

Ключевым преимуществом НКРТ является возможность работы при давлении выше атмосферного даже при умеренных температурах, что исключает необходимость создания вакуума в конденсаторе и снижает риски подсоса воздуха. Помимо этого, высокая плотность пара у НКРТ (в 10–15 раз выше, чем у водяного пара при тех же условиях) позволяет значительно уменьшить габариты и металлоёмкость турбомашин и теплообменного оборудования, а также здания турбинного цеха [2].

Но применение НКРТ связано с рядом ограничений: большинство из них термически нестабильны при температурах выше 150–200 °С, что исключает из прямого использование во втором контуре водо-водяных реакторов без применения бинарного цикла. Также значительную проблему представляют экологические аспекты: несмотря на нулевой потенциал разрушения озонового слоя у ГФУ, их высокий потенциал глобального потепления (GWP) стимулирует переход к природным хладагентам, обладающим низким GWP, но требующим повышения мер безопасности из-за горючести или токсичности.

Результаты исследования подтверждают необходимость комплексного подхода к выбору НКРТ, учитывающего не только термодинамическую эффективность, но и конструктивные, эксплуатационные и экологические ограничения. В перспективе применение НКРТ может стать ключевым элементом в разработке гибридных энергетических систем на базе инновационных реакторов, особенно при их интеграции с ORC-установками для утилизации вторичного тепла.

Литература

1. **Д.П. Гохштейн.** О тепловом цикле атомных энергетических установок. Серия «Физика и теплотехника реакторов, АТОМИЗДАТ, Москва — 1958 г., с. 198–204.
2. **Кузьмин К.В.** Расчетные оценки вариантов применения НКРТ в тепловых циклах АЭС. Магистерская диссертация / М.: НИУ МЭИ, 2024 г. — 84 с.

*Д.В. Князькин, студ.; Д.С. Николаев,
Д.Д. Курицин, Т.Д. Демкина, асп.;
Д.Н. Солнцев, к.т.н., доц. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород)*

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВТГР

При анализе теплогидравлических характеристик активной зоны высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) значительная часть неопределённости в численных расчётах связана с выбором модели турбулентности. Несмотря на обширные исследования [1–2], экспериментальная валидация моделей для областей с байпасным потоком остаётся ограниченной. В связи с этим была выполнена расчётно-экспериментальная работа по обоснованию выбора модели турбулентности для топливной колонны ВТГР.

Создан аэродинамический стенд с изотермическим воздушным потоком. Экспериментальная модель представляла собой упрощенный плоский фрагмент топливной колонны длиной 800 мм и шириной 360 мм, включающий 5 каналов охлаждения шириной 16 мм, канал поглощающего стержня с дросселирующим элементом и 2 межблочных зазора по 2 мм. Масштабирование выполнялось по числу Рейнольдса: в зазорах Re находился в диапазоне 4000–7000, в каналах охлаждения 13 000–25 000.

Измерения скорости проводились лазерным доплеровским анемометром. Численные расчёты выполнены в ANSYS CFX 2022 с использованием моделей SST, BSL-EARSM и SSG.

Сопоставление результатов показало, что модель SSG обеспечивает наименьшие отклонения: около 6% в каналах и 13% в межблочном зазоре. Для SST отклонения составили 9% и 16%, для BSL-EARSM — 13% и 21%. В целом результаты подтверждают, что модель SSG обеспечивает лучшее воспроизведение течения в каналах и может быть рекомендована авторами для расчётных исследований гидравлики активных зон ВТГР. При этом устойчиво завышенные погрешности в межблочном зазоре, характерные для всех протестированных RANS-моделей, указывают на ограниченность их применения в условиях переходного режима, что делает необходимым проведение исследований на полномасштабной геометрии для корректного описания структуры потока в узких зазорах. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FSWE-2024-0003).

Литература

1. **Sato H, Johnson R, Schultz R.** Computational fluid dynamic analysis of core bypass flow phenomena in a prismatic VHTR // *Annals of Nuclear Energy*. — Т. 37, № 9, С. 1172–1185. — 2010.
2. **Carlos Alberto Brayner Oliveira Lira, Pedro Paulo Dantas Souza Paiva.** CFD Analysis of the VHTR Prismatic Core with Variation of Geometry Parameters // *Brazilian Journal of Radiation Sciences*. — Т. 8, № 3B. — 2020.

А.В. Михалев, асп.; рук. С.Б.Кравец, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПОДХОДЫ ОЦЕНКИ РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ АВАРИИ НА АС

Авария на атомной станции (АС) — это нарушение нормальной эксплуатации, при котором происходит выброс радиоактивных веществ и (или) ионизирующего излучения за предусмотренные границы и количества, превышающих предусмотренные пределы.

Сегодня для защиты населения при аварии на АС предполагается проведение ряда защитных мероприятий (йодная профилактика, укрытие или эвакуация населения в безопасную зону), для которых критерием необходимости их проведения является прогнозируемая доза облучения [1].

Для повышения уровня безопасности населения, в дополнение к детерминистическим оценкам прогнозируемой дозы, в работе предлагается использовать вероятностное прогнозирование риска для населения, который формируется в течение протекания аварии. При этом, в упрощенном виде задача сводится к определению риска в виде формулы (1):

$$R(t) = Q_{\text{отказов}}(t) \times Q_{\text{эвакуации}}(t) \times Q_{\text{невозстановления}}(t) \quad (1)$$

где $Q_{\text{отказов}}$ — вероятность отказа оборудования на АС; $Q_{\text{эвакуации}}$ — вероятность неспешной эвакуации за располагаемое время; $Q_{\text{невозстановления}}$ — вероятность невозстановления оборудования за располагаемое время.

В качестве возможных подходов для решения задачи в работе рассмотрены метод с использованием Марковских процессов, метод деревьев событий и использование логико-вероятностной модели вероятностного анализа безопасности.

Применение данного подхода позволит снизить возможные неопределенности, возникающие при принятии решений о необходимости реализации защитных мер и в сроках их проведения в каждом конкретном случае. Также результаты работы могут быть использованы при определении вероятности раннего аварийного выброса при разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2.

Литература

1. **НРБ-99/2009.** Нормы радиационной безопасности. Утв. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47.

Х.Ю. Попандопуло, студ., О.А.Зудилина, соиск.
(СПБПУ, Санкт-Петербург);

рук. Д.В. Бабак, инж. -иссл.

(«Центр компьютерного инжиниринга» *CompMechLab®*)

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНОЙ СБОРКИ ВВЭР-1200: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

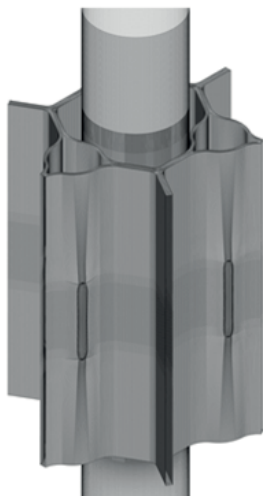


Рис. 1. Конечно-объемная модель ДР

Целью данного исследования является количественный анализ локального и интегрального влияния дистанционирующей решетки (ДР) на гидродинамику и сопряженный теплообмен ТВС ВВЭР-1200, с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). Ключевой задачей является валидация и верификация подходов к моделированию турбулентности исследуемого объекта, в соответствии с опытом работы [1], для последующего перехода к моделированию полномасштабной ТВС. Конечно-объемное структурированное блочное разбиение модели исследуемой области выполнено при помощи программных инструментов *ICEM CFD*, *ANSYS Meshing*. Полученная конечно-объемная модель представлена на рис. 1. Трехмерное моделирование стационарного сопряженного теплообмена проведено в ПО *ANSYS CFX*. Граничные условия соответствуют параметрам номинального режима работы ВВЭР-1200.

На основе анализа данных, полученных в ходе численного моделирования, были установлены ключевые гидродинамические характеристики исследуемой области: коэффициент гидравлического сопротивления ($\xi=0.84$), пространственная протяженность зоны влияния ДР на поток — $L=14d_h$, где d_h — гидравлический диаметр, определяемый соотношением (1):

$$d_h = d_{\text{ТВЭЛ}} \left((2\sqrt{3}/\pi)(s/d_{\text{ТВЭЛ}})^2 - 1 \right), \quad (1)$$

где $d_{\text{ТВЭЛ}}$ — диаметр твэла, s — зазор между соседними твэлами.

Литература

1. Smith, B.L., et al. "Report of the OECD/NEA KAERI rod bundle CFD benchmark exercise." Paris, France: NEA/CSNI (2013) 5 (2013).

Х.Ю. Попандопуло, А. Ю. Балуцков, студ.;
 рук. А.М. Лобачев, инж.-иссл., В.С. Модестов, к.т.н.
 (НОЦ «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной
 энергетике» СПбПУ, Санкт-Петербург), Д.В. Бабак, инж.-иссл.
 («Центр компьютерного инжиниринга» CompMechLab®)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ ПРИ ОДНОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И КИПЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Исследование гидродинамики и теплообмена в зернистых средах (шаровых засыпках) является актуальной задачей для проектирования элементов активных зон, теплообменных аппаратов. Целью работы является экспериментальное исследование падения давления в модели шаровой засыпки в диапазоне режимов от однофазной фильтрации до развитого кипения и получение корреляционной зависимости перепада давления от паросодержания.

Исследование проведено на термодинамической установке замкнутого типа, схема рабочего участка (РУ) приведена на рис. 1. РУ представляет собой цилиндрическую колонну высотой 300 мм и внутренним диаметром 51 мм, высота шаровой засыпки в эксперименте составляла 98 мм, диаметр шара 2 мм, пористость шаровой засыпки 0.414. Моделирование внутреннего тепловыделения в сферических элементах производится при помощи высокочастотной индукционной катушки. Паросодержание в эксперименте определяется косвенным методом по балансу энергии.

В ходе экспериментов получены гидравлические характеристики однофазного течения, наилучшее соглашение с полученными данными имеет формула, приведенная в работе [1], определено качественное изменение гидравлического сопротивления при двухфазном течении теплоносителя.

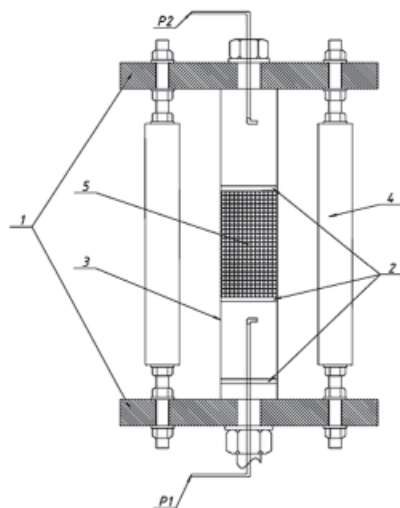


Рис. 1. Схема рабочего участка.
 1 — фланцы, 2 — перфорированные пластины, 3 — цилиндрическая колонна, 4 — шпильки, 5 — шаровая засыпка, P1, P2 — отборы давления

Литература

1. Ausschusses K., Postfach S. Nuclear Safety Standards Commission (KTA) Reactor Core Design of High-Temperature Gas-Cooled Reactors Part 3: Loss of Pressure through Friction in Pebble Bed Cores. — 1981.

Секция 43

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Problems of thermonuclear power engineering and plasma technologies

Председатель секции:

член-корреспондент РАН, д.т.н. Дедов Алексей Викторович

Секретарь секции: д.т.н. Лубенченко Александр Владимирович

Д.Л. Пименов, студ. (НИУ МЭИ); рук. Е.Д. Казаков, доц. (НИУ «МЭИ»); конс. Е.Ю. Брагин; А.А. Косарев; И.А. Костриченко; С.С. Гусев; В.В. Чечуро (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

ТЯГОМЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В МАГНИТНОМ СОПЛЕ

В последние несколько десятков лет ведется активное развитие электрических ракетных двигателей (далее — ЭРД), как одного из наиболее перспективных направлений в области транспортных космических технологий [1]. Одной из причин этому является крайне высокий показатель удельного импульса, который недостижим для химических ракетных двигателей и который является ключевым параметром в вопросе разгона аппарата непосредственно в космическом пространстве. Не менее важным является и показатель тяги.

На стенде ПН-3 представлен макет одного из видов ЭРД, а именно геликонный плазменный ракетный двигатель (далее — ГПРД), который составляет серьезную конкуренцию более традиционным ЭРД, таким как ионные или стационарные плазменные двигатели по ряду параметров, из которых одним из наиболее важных является КПД, показывающий то, какая часть вводимой мощности идет непосредственно на создание тяги, которая в свою очередь измеряется различного рода тягомерами. Также этот параметр крайне важен и для последующего определения различных каналов потерь [2].

Для исследований на стенде ПН-3 с макетом ГПРД используется тензометрический тягомер с сеточной мишенью, с помощью которого определяется не только тяга двигателя, но также КПД и удельный импульс. При этом тяговые исследования проводятся при различных параметрах плазменного разряда, возможность изменять которые также реализована на стенде.

В ходе исследований были проведены расчеты зависимости КПД двигателя от расхода рабочего газа, величины индукции магнитного поля под антенной, пробочного отношения и вводимой ВЧ мощности.

Литература

1. Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Циолковский К.Э. Термояд и космос // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. №. 3. С. 5.
2. Брагин Е.Ю. и др. Создание безэлектродного плазменного ракетного двигателя // Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии. 2023. С. 26–27.

Я.А. Голов, студ.; рук. Д.И. Кавыршин, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) является одним из наиболее точных и информативных методов диагностики электронной компоненты плазмы. Суть диагностики заключается в анализе спектрального состава и интенсивности лазерного излучения, рассеянного на свободных электронах плазмы [1]. Внедрение данного метода на установке ПЛМ-М из анализа спектра рассеяния лазерного излучения определять температуру и концентрацию электронов плазмы в режиме реального времени.

В работе решена ключевая техническая задача — минимизация фонового излучения и паразитных отражений лазерного луча, влияние которых на получаемые при диагностике данные описано в [2]. Для этого был разработан и установлен специализированный вакуумный фланец с оптическим окном, обеспечивающий выход лазерного пучка за пределы камеры после прохождения им области измерений. Диагностика осуществлялась с использованием лазера LQ529A ($\lambda=1064$ нм), многоканального спектрометра AvaSpec и спектрографа-монокроматора MS750, оборудованного цифровой камерой HS 101H.

В ходе экспериментов с плазмой гелия, полученной с помощью катодного разряда, были зарегистрированы спектры ТР. Последующая обработка данных, включающая коррекцию фона, учет телесного угла детекции и аппроксимацию спектральных линий гауссовым профилем, позволила определить параметры плазмы по значению полуширины на высоте. Полученные значения электронных параметров плазмы согласуются с ожидаемыми параметрами для установки ПЛМ-М.

В результате работы диагностика томсоновского рассеяния была успешно адаптирована и реализована на установке ПЛМ-М. Разработанный подход позволяет проводить точные и малоинвазивные измерения электронных параметров плазмы, что открывает новые возможности для исследований в области физики плазмы на данной установке.

Литература

1. **Lochte-Holtgreven, V.** Methods of Plasma Research [Text] / V. Lochte-Holtgreven — Moscow: Mir, 1971.
2. **Kajita S. et al.** Performance of JT-60SA divertor Thomson scattering diagnostics // Review of Scientific Instruments. — 2015. — V. 86. — P. 083511.

*М.Д. Филиппов, асп.; И.М. Павлов, Э.И. Гареев студ.;
рук. А.В. Дедов, д.т.н., член-кор. РАН. (НИУ «МЭИ»)*

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СТРУКТУРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ: ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ

Кипение является важным механизмом теплопередачи, эффективность которого определяется целым комплексом факторов: свойствами поверхности нагрева, параметрами рабочей жидкости и внешними условиями. Повышение интенсивности теплообмена и создание эффективных систем охлаждения остаются актуальными задачами современной науки.

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена при кипении насыщенной дистиллированной воды в большом объеме на поверхности, модифицированной электронным лучом при атмосферном давлении. Исследования выполнены для образца, модифицированного в форме «звезды» в режиме «прямой ход», а также для немодифицированного образца из меди.

Увеличение критического теплового потока (КТП) при кипении на модифицированной поверхности в сравнении с гладкой поверхностью составило 85,6% (КТП достиг значения 2,26 МВт/м²). На рисунке 1 представлена кривая кипения дистиллированной воды на модифицированном образце, на гладком образце, а также расчеты по формулам Ягова и Rohsenow.

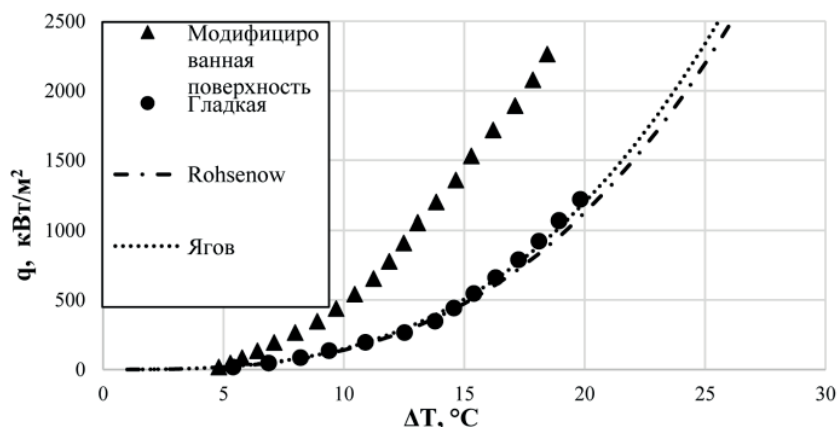


Рис. 1. Кривая кипения дистиллированной воды на образце, модифицированном электронным лучом

Э.И. Гареев, И.М. Павлов студ.;
М.Д. Филиппов, асп.; А.В. Беляев доц.;
рук. А.В. Дедов, д.т.н., член-кор. РАН. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА В МОДЕЛЬНОМ МИНИКАНАЛЬНОМ КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Миниканальные теплообменники продолжают привлекать внимание благодаря высокой удельной теплопередаче и компактности. Однако эффективность двухфазного теплообмена в них существенно зависит от геометрии поверхности и режимов течения. Модификация внутренних стенок канала накаткой позволяет увеличить микрорельеф и количество центров зарождения паровых пузырей, что потенциально приводит к повышению коэффициента теплопередачи.

В работе представлены результаты экспериментального исследования кипения рабочего тела в миниканалах кожухотрубного теплообменника при разных структурах поверхности. Получены кривые кипения для гладких и модифицированных миниканалов при широком диапазоне массовых скоростей. Показано, что применение накатки приводит к заметной интенсификации теплообмена на малых расходах, а также сохраняет преимущества при высоких массовых скоростях.

Увеличение критического теплового потока (КТП) при малых расходах при кипении на модифицированной поверхности в сравнении с гладкой поверхностью составило 8.9%. На рисунке 1 представлена кривая кипения фреона R125 на модифицированных методом накатки миниканалах, на гладких миниканалах.

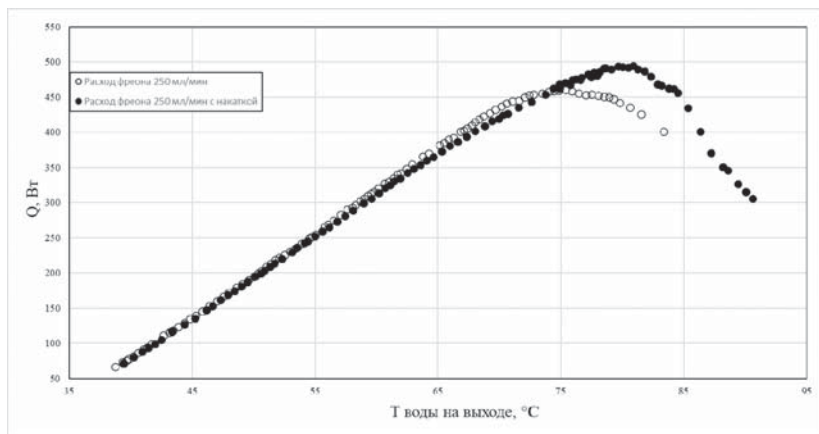


Рис. 1. Кривая кипения R125 на гладких и модифицированных методом накатки миниканалах, при расходе воды 0,50 л/мин. и расходе фреона 250 мл/мин

*Л.В. Лебединский, Н.А. Григоров, Ю.А. Борисова,
Я.О. Глаголев, студ.; рук. К.В. Чан, ст.пред. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ИЗ СОПЛА ЗОНДАМИ МАХА НА УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Плазменные реактивные двигатели являются ключевой перспективной разработкой для реализации дальних космических перелетов и поддержания орбитальных спутниковых группировок [1]. Ключевым параметром эффективности плазменного ускорителя является скорость истечения плазменного потока. На базе уникальной установки ПЛМ-М [2] в НИУ «МЭИ» проведена серия экспериментов по определению параметров плазменного потока вблизи сопла при разных методах генерации плазмы. Установка ПЛМ-М оснащена двумя соленоидами и восьмиполюсной мультикасповой системой, формирующими конфигурацию плазменного сопла.

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа чисел Маха при генерации плазмы двумя принципиально различными методами: дуговой разряд на основе ступенчатой ионизации, геликонный разряд. Скорость потока и число Маха были определены с помощью зонда Маха в области истечения плазменного потока из магнитного сопла плазменной установки ПЛМ-М. В докладе приводится сравнение полученных профилей скоростей для обоих методов генерации.

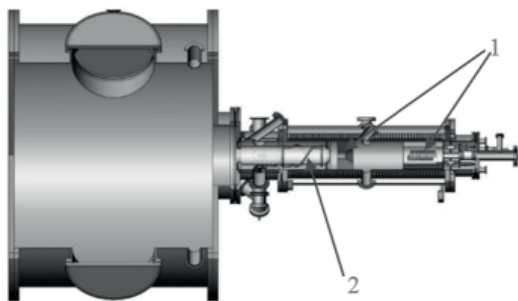


Рис. 1. Система генерации плазменного потока на ПЛМ-М.
1 — катод-анодное пространство; 2 — геликонная антенна

Работа выполнена при поддержке Госзадания FSWF-2025-0001 и гранта РНФ 25-29-00626

Литература

1. **Andreescu, A.-M.T. et al.** Development and Testing of a Helicon Plasma Thruster Based on a Magnetically Enhanced Inductively Coupled Plasma Reactor Operating in a Multi-Mode Regime // Appl. Sci. 2024, 14, 8308.
2. **Будаев, В.П., Федорович, С.Д., Дедов и др.** Испытания вольфрамовой облицовки дивертора в плазменной установке ПЛМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. № Том 47, выпуск 2. С. 49–57.

К.Ф. Калугина, студ.;
рук. С.Д. Федорович, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ВТСП — КАТУШКИ ДЛЯ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ УСТАНОВКИ ПЛМ-М

Эффективное возбуждение и удержание плазмы в геликонном разряде длительное время требует создания стационарного магнитного поля высокой индукции. Использование традиционных медных электромагнитов для этих целей сопряжено с высоким энергопотреблением и сложностями отвода тепла.

Применение высокотемпературных сверхпроводников позволяет снизить энергозатраты и достичь высоких значений магнитного поля. Целью данной работы является разработка проекта ВТСП-соленоида и системы его криостатирования, адаптированного для интеграции в существующую плазменную установку ПЛМ-М.

Для выбора оптимальных параметров проведён сравнительный анализ существующих ВТСП-соленоидов сопоставимой мощности и индукции поля. Было установлено, что для поддержания магнитного поля 1–3 Тл, будет использоваться источник постоянного тока, обеспечивающий до 300 А [1]. В качестве базового материала рассматривается лента ReBCO 2G поколения.

Предложена конструкция криостата типа «труба в трубе». Данное решение обеспечивает компактность и позволяет разместить систему через фланец диаметром 300 мм. Конструкция предусматривает возможность осевого перемещения всей сборки (катушка в криостате) относительно антенны. Это позволяет варьировать положение области максимальной магнитной индукции вдоль разрядной камеры без изменения рабочих параметров, что является ключевым преимуществом для оптимизации плазменного разряда.

Литература

1. Агеев А.И., Богданов И.В., Козуб С.С. и др. Опыт создания ВТСП-2 кольцевых обмоток возбуждения синхронного генератора большой мощности // Электричество. — 2024. — № 12. — С. 4–14.

*М.Д. Мартиросян, студ.;
рук. А.Т. Комов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ВРЕМЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Охлаждение диспергированным потоком уже зарекомендовало себя как необходимая часть таких областей человеческой деятельности, как микроэлектроника, металлургия и физическая химия [1] — также, это системы выработки АЭ и вопросы термоядерной энергетики [2].

Для построения физически корректной модели испарения капли использовались следующие допущения, впоследствии подтвердившиеся: основной механизм передачи тепла — теплопроводность через паровую плёнку, задача квазистационарна, время нестационарности пренебрежимо мало, одномерное ламинарное течение паровой плёнки [3], форма капли в начале испарения — равновеликий изначальной капле цилиндр, нет перегрева пара, излучение пренебрежимо мало, стенка непроницаема.

В таком случае применим подход [3] для отыскания начальной зависимости, который согласуется с соображениями Исаченко [4]. Далее, стоит оттолкнуться от грубой модели течения плёнки в диспергированном потоке [5]. Зависимость толщины паровой плёнки в ДУ испарения за счёт теплопроводности от неё же исключим с помощью приближения из [6].

Таким образом, после финального интегрирования, получим зависимость с произвольной постоянной. Найдём её из опорных экспериментов Ревы [7] — они проводились для капель радиусом от 500 мкм до 2800 мкм. Погрешность сопоставима с погрешностью эксперимента (-10%...+20%). С поправками (т.ф.с с индексом «с» есть т.ф.с пара, взятого при температуре стенки) формула уточняется: (-10%...+15%).

$$\tau = 10^{-8} \frac{r^{15/8} h^{5/2} L_G}{\Delta T^2 \lambda^{15/8} n} \sqrt[8]{\frac{\rho_{ж} \rho_n^2}{C^3 p n g^3}} \sqrt[4]{\lambda_{ж} \Delta p} \sqrt{\frac{RT_s}{DMP_s}} \mu_n^{7/8} \left(\frac{\mu_n}{\mu_c}\right)^{0.3} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_c}\right)^{0.6} \quad (1)$$

Данная формула аналитически объясняет теплопередачу капли диспергированного потока с весьма хорошей точностью и может быть использована в диапазоне радиусов капель эксперимента Ревы до температурного напора между каплей и поверхностью около 130 К.

Литература

1. **Mudawar I.** // IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. 2001. V. 24. P. 122–141.
2. **Евтихин В.А.** и др. А/с RU2051430C1.
3. **B.S. Gottfried et al.** // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1966. Vol. 9, pp. 1167–1187.
4. **Исаченко В.П.** и др. Струйное охлаждение. М: Энергоатомиздат, 1984.
5. **J.L. Xie et al.** // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 48, pp. 342–348.
6. **Avedisian C.T. et al.** // Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 30. pp. 379–393. 1987.
7. **Рева Л.С.** и др. Вестник технологического ин-та, 2016. Т. 19. № 5. С. 121–126.

*А.Т. Гогинашвили, студ.;
рук. Д.И. Кавыршин, к. ф.-м. н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

В данной работе описана методика определения параметров плазмы: электронной температуры и концентрации, их пространственных распределений и зависимость от режима нагрева и других параметров системы.

Плазменные исследования не только находят широкое применение в технологических процессах, но и являются основой будущих термоядерных установок. Однако точный контроль параметров такой плазмы остается сложной задачей. Традиционные зондовые методы в таких условиях могут столкнуться с принципиальными ограничениями, такими как деградация поверхностей датчика или внесение возмущений в плазму [1].

Спектральная диагностика предлагает подход, основанный на анализе электромагнитного излучения плазмы. Неинвазивность является ключевым преимуществом данного метода, так как предполагает сохранение целостности структур системы как механических, так и электромагнитных [2].

Разработка автоматизированного алгоритма позволяет повысить эффективность работы с большими объемами данных. Ключевыми трудностями являются решения обратных задач, разделение контуров, интерпретация исходных данных. Программный комплекс становится ключевым инструментом как для фундаментальных исследований, так и для прикладных задач управляемого термоядерного синтеза.

В процессе работы была разработана программа, позволяющая провести полную цепочку действий, необходимую для обработки данных оптической диагностики: от калибровки сигнала до оценки неопределенности результата.

Литература

1. Хаддистоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. М.: Издательство “Мир”, 1967.
2. Чиннов В.Ф., Кавыршин Д.И. Излучательные свойства и спектроскопия низко- и высокотемпературной плазмы. М.: Издательство МЭИ, 2024.

М.А. Андреев, студ.;
рук. А.В. Лубенченко, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК НИОБИЯ

Резистивная память с произвольным доступом активно изучается и привлекает значительное внимание в связи с возможностью ее использования в следующем поколении микросхем энергонезависимой памяти. Работа данных устройств электронезависимой памяти основана на эффекте резистивного переключения, который заключается в быстром и обратимом переходе материала между двумя устойчивыми состояниями с различными сопротивлениями. Основными механизмами вызывающими мемристивный переход являются: градиент электрического поля, воздействие быстрых электронов, градиент концентраций материала и градиент температур [1]. Однако влияние этих процессов на мемристивный переход плохо изучено, вследствие чего этот эффект не может использоваться в промышленности.

В настоящей работе приведены результаты термоциклирования мемристивных структур на основе оксида ниобия толщиной 10 и 15 нм. Состав плёнок был исследован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В результате послойного анализа были получены следующие структуры: плёнка 15 нм — 7,6 нм Nb_2O_5 , 1,2 нм субоксидов, плёнка 10 нм — 6,8 нм Nb_2O_5 , 2,4 нм субоксидов. Термоциклирование осуществлялось путём нагревания мишени до 500 К и последующим остыванием до комнатной температуры на воздухе. Снятие вольт-амперных характеристик производилось при 350 К, 400 К, 450 К, и 500 К. При первом цикле нагревания плёнки не испытывали мемристивных переключений на всём интервале температур и вели себя схоже с резистивными элементами с эквивалентным сопротивлением 200–300 Ом. При повторном нагревании наблюдался переход из высокоомного режима (20 кОм) в низкоомный (200 Ом). При этом напряжение необходимое для этого перехода увеличивалось при росте температуры мишени. На плёнке толщиной 15 нм наблюдался биполярный переход, и его природа была связана с градиентом электрического поля в плёнке. В то время как у плёнки толщиной 10 нм мемристивный переход был униполярный и его вид показывал, что он связан с градиентом концентраций в мемристивной структуре.

Литература

1. **Yang JJ, Strukov DB, Stewart DR.** 2013 Memristive devices for computing. Nat. Nanotechnol. 8, p 13–24.

*Ю.А. Борисова, С.Д. Зимов, студенты;
рук. С.Д. Федорович, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РОСТА НАНОСТРУКТУРЫ ТИПА «ПУХ» НА ВОЛЬФРАМЕ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРЕН

Эксперименты, выполненные на установке ПЛИМ-М [1], показали, что при воздействии He-плазмы на образцы вольфрама, на его поверхности вырастают структуры, называемые «пухом». Модель роста этих структур описывается теорией поверхностной диффузии (миграции) адатомов [2].

При воздействии плазмы с параметрами пристеночной плазмы токамака на образцы вольфрама с различным размером и кристаллографической ориентацией зерен наблюдается разная толщина пуха. На крупнозернистом вольфраме пух растет быстрее, чем на мелкозернистом и ультрамелкозернистом. На зернах разной ориентации вырастают отличающиеся структуры, что согласуется с результатами работы [3]. В эксперименте использовались образцы с вытянутыми зернами прокатного листового вольфрама.

Установлено, что можно замедлить рост пуха, используя ультрамелкозернистый вольфрам или наоборот, ускорить его рост и увеличить толщину слоя. Так, для первой стенки токамака, в качестве материала которой используется вольфрам, важны свойства поверхности, при которых пух отсутствует. В тоже время, развитая поверхность типа «пух» востребована для создания материалов с новыми теплофизическими и электрофизическими свойствами.

Литература

1. S.D. Fedorovich, Yu.V. Martynenko, V.P. Budaev, D.I. Kavyrshin, A.V. Karpov, Quang Vinh Tran, M.V. Lukashevsky, M.Yu. Nagel, K.A. Rogozin, A.A. Kon'kov. Study of nanostructured layer growth on plasma-facing materials irradiated with helium plasma. // May 2024 Fusion Science & Technology 80(9):1–10.
2. Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель. Модель образования «пуха» на поверхности вольфрама // Физика плазмы, 2012, том 38, № 12, с. 1082–1086.
3. O. El-Atwani, Sean Gonderman, Mert Efe, Gregory De Temmerman, Thomas Morgan, Kirill Bystrov, Daniel Klenosky, Tian Qiu and J.P. Allain. Ultrafine tungsten as a plasma-facing component in fusion devices: effect of high f lux, high fluence low energy helium irradiation // Nucl. Fusion 54 (2014) 083013.

*Ю.А. Борисова, Н.А. Григоров, С.Д. Зимов,
Л.В. Лебединский, С.С. Рудницкий, студенты;
рук. М.В. Лукашевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М «НИУ «МЭИ»

Разработан СВЧ-интерферометр для установки ПЛМ-М — плазменного линейного мультикаспа (стационарная магнитная ловушка). Назначение установки, находящейся в «НИУ «МЭИ» на кафедре ОФиЯС: создание плазмы, по своим параметрам близкой к параметрам пристеночной плазмы термоядерных установок. Коллективом лаборатории был выбран принцип действия интерферометра и определены его ключевые параметры, далее ООО «ДОК» был разработан проект и изготовлен интерферометр. После чего произведен монтаж, настройка и ввод в действие изготовленной системы.

Как известно, основным результатом интерферометрических измерений является набег фазы $\Delta\varphi$ при прохождении электромагнитной волны через плазму. Величина $\Delta\varphi$ пропорциональна $\lambda \int_L n_e(l) dl$, где λ — длина волны зондирующего излучения, n_e — концентрация электронов в плазме, интегрирование производится по всему пути распространения волны в плазме L . Частота зондирующего излучения разработанного интерферометра может варьироваться в диапазоне от 91 до 99 ГГц ($\lambda = 3,30 \div 3,33$ мм). Искомый набег фазы $\Delta\varphi$ может быть измерен как разность фаз между генерируемыми интерферометром сигналом промежуточной частоты и референсным (опорным) сигналом, имеющими частоты 5 МГц.

Для измерения разности фаз изготовлен фазометр, принцип действия которого основан на измерении разности фаз с помощью микросхемы AD8302 (электронный измеритель разности фаз) [1].

Проведены эксперименты по интерферометрии в разных областях плазменного разряда в установке ПЛМ-М при различных режимах работы разряда. Полученные данные о концентрации электронов плазмы обрабатывались совместно с результатами диагностики электрическими зондами.

Литература

1. Alexey Drozd; Dmitriy Sergeev. (2022) Design of a phasemeter for real-time measurements of the average plasma density with the microwave interferometer of the tokamak T-15MD.

Д.М. Соин, студ.; рук. С.Д. Федорович, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ГЕЛИКОННОЙ АНТЕННЫ НА УСКОРЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М



Рис. 1. 3D-модель левозакрученной геликонной антенны

С целью исследования влияния геометрии геликонной антенны на ускорение плазменного потока [1] в установке ПЛМ-М была создана модельная установка с новым рабочим участком. Из медной шины были изготовлены две геликонные антенны одинаковых габаритов с правой и левой закруткой (рис. 1). Участок состоит из кварцевой трубки, зонда Ленгмюра, магнитной системы из двух ферритных колец, антенны, генератора ВЧ-излучения, системы согласования и вакуумной системы. В кварцевую трубку напу-

скался аргон, после чего на геликонную антенну, через систему согласования, подавалось напряжение от ВЧ-источника. Подаваемая мощность — до 700 Вт на частоте 13,56 МГц.

В данной работе представлены результаты измерения параметров полученной плазмы с помощью зондов Ленгмюра и спектрометра для различных сочетаний направления индукции магнитного поля и геометрии геликонной антенны в зависимости от давления в разрядной камере. Определены режимы, при которых геометрия геликонной антенны влияет на направление распространения плазменного потока.

Работа выполнена при поддержке Госзадания FSWF-2025-0001 и гранта РНФ 25-29-00626

Литература

1. David G, Miljak and Francis F Chen Helicon wave excitation with rotating antenna fields, Received 30 July 1997, in final form 30 November 1997.

*Г.А. Мочалов, студ.; Е.Д. Вохминов, студ.;
рук. С.В. Серушкин, к.т.н., старший преподаватель
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКОВ

Первая стенка установок типа токамак — критический элемент установок управляемого термоядерного синтеза, испытывающий экстремальные тепловые нагрузки (до 4 МВт/м^2 в проекте токамака с реакторными технологиями (ТРТ)) [1, 2]. Для проекта токамака ТРТ требуется разработка теплоаккумулирующих панелей (ТАП) без охлаждающих каналов, что обуславливает необходимость оригинальных конструктивных решений [1]. В работе рассматривается новый подход к конструкции ТАП с тремя техническими предложениями: 1) механическое соединение облицовки и основания типа «ласточкин хвост» вместо пайки; 2) модульная архитектура с возможностью замены отдельных кассет; 3) оптимизация материалов в зависимости от энергонапряженности зоны (дивертор, лимитер, основная стенка). Конструкцию можно применить и для стенки с использованием теплоносителя для охлаждения. В ходе работы выполнен анализ возможных материалов облицовки, проведены расчёты толщины плиток методом нестационарной теплопроводности; разработаны 3D-модели и схемы устройства; обоснован выбор возможных кандидатов материалов облицовки (C/C и W-Cu композиты, PGT графиты) и основания [3]. Предполагаются следующие области применения: ТАП предназначена для первого этапа эксплуатации ТРТ, испытания защитных систем панелей первой стенки, отработки альтернативных конструкций дивертора и применения в ядерной энергетике [2, 3].

Литература

1. Пискарев П.Ю., Мазуль И.В., Маханьков А.Н. и др. Компоненты, обращенные к плазме, в проекте ТРТ: конструкция, материалы и технологии. СПб.: АО «НИИЭФА», 2024.
2. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 970–985.
3. Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Политехнического университета, 2006. — 348 с.

*П.В. Лобанов, студ.;
рук. А.В. Лубенченко, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ПИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В РФЭС

У теоретического описания нахождения относительных концентраций методом РФЭС, есть проблема определения вычитания фона. Для решения этой проблемы, можно производить монте-карло моделирование траекторий вышедших электронов, для получения интенсивностей упруго рассеянных в твердом теле электронов.

У метода монте-карло помимо преимуществ есть и недостатки, такие как медленная сходимость, так как погрешность метода обратно пропорциональна корню квадратному от количества траекторий. Для ускорения метода применяются измененные алгоритмы, одним из которых является локальная оценка. Локальная оценка позволяет значительно уменьшить количество траекторий, требуемых для достижения желаемой точности, но замедляет обработку одной траектории. Но локальная оценка метода монте-карло ранее применялась только для решения уравнений переноса фотонов в рассеивающих средах. Ранее локальная оценка применялась для решения уравнений переноса фотонов в полупрозрачных средах.

Для решения этой задачи был написан код на языке программирования Python. Итогом работы, которого являются угловые распределения и оценка погрешности моделирования. Получены угловые распределения электронов отраженных от твердого тела и вышедших из твердого тела под действием фотоионизации. Сечение фотоионизации было подробно рассмотрены в работе [1].

Литература

1. **Яблонский А., Пауэлл К.Дж.** Practical expressions for the mean escape depth, the information depth, and the effective attenuation length in Auger-electron spectroscopy and x-ray photoelectron spectroscopy // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2009. Т. 27. № 3.
2. **Вернер В.С.М.** Differential surface and volume excitation probability of medium-energy electrons in solids // Institut für Allgemeine Physik, Vienna University of Technology. 2006.
3. **Аккерман А.Ф.** Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М.: Энергоатомиздат, 1991.

М.С. Богатов, студ.; Д.А. Бирюков, доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЗОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ДЛЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ ПРИ НИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Исследование зависимости расстояния электрического пробоя водных растворов от их удельной электропроводности в низковольтном диапазоне напряжений актуально для штатных режимов работы электрооборудования. В большинстве исследований [1] рассматривается механизм пробоя при высоких напряжениях, актуальных лишь для малого круга практических задач. Для проектирования и диагностики низковольтного оборудования более актуальны данные, полученные при напряжениях, близких к рабочим.

В данной работе рассматривается возникновение электрического пробоя в жидкости с различными значениями электрической проводимости, начиная от диэлектрика и заканчивая электролитом. Между электродами устанавливалось постоянное напряжение 72 В. Удельная электрическая проводимость жидкого диэлектрика варьировалась от 1.6 до 1089 мкСм/см путем добавления в дистиллированную воду хлорида натрия. Момент пробоя фиксировался высокоскоростной камерой. Расстояние пробоя определялось оптически посредством анализа видеок кадров с использованием эталона длины в виде резьбы на электроде.

Результаты эксперимента показывают, что при малых значениях проводимости расстояние возникновения пробоя минимально. При повышении проводимости наблюдается резкое увеличение расстояния, с последующим более пологим нарастанием. Скачок обуславливается появлением пузырьков газа вследствие электролиза и возможностью их ионизации, чего не наблюдается в чистом диэлектрике.

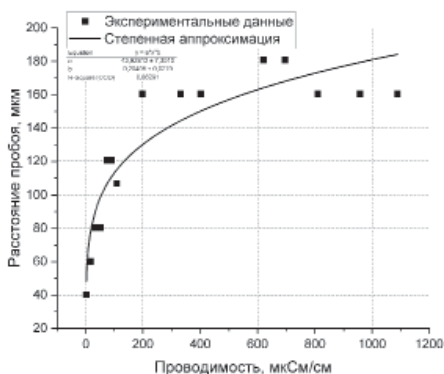


Рис. 1. Расстояние пробоя в зависимости от электрической проводимости воды. Точками отмечены результаты эксперимента, линией — аппроксимация степенной функцией

Литература

1. **Панов В.А.** Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах // Физика Плазмы” Москва: Editura, Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет). — 2017.

С.А. Седельников, студ.;
рук. А.В. Лубенченко, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СПЛОШНОСТИ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

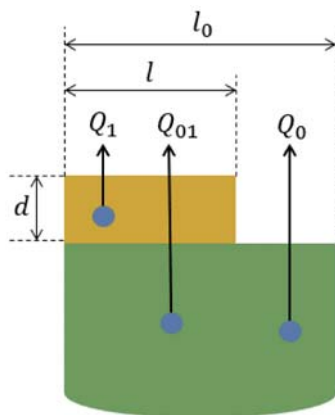


Рис. 1. Схема островковой поверхности пленки

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) широко используется для исследования поверхности [1]. Преимуществом этого метода является то, что он не разрушает исследуемый образец. Анализируя спектры, полученные методом РФЭС, можно получить информацию о структуре исследуемой поверхности.

Существующие методы анализа поверхности тонких пленок основываются на модели плоскопараллельных слоев, однако поверхности пленок являются неоднородными (рисунок 1). Неоднородность поверхности тонкой пленки описывается коэффициентом сплошности — отношением площади неоднородностей ко всей площади поверхности и в двумерном случае — отношением размера неоднородности к размеру поверхности.

Неоднородности поверхности пленки существенно влияют на свойства самой пленки, поэтому определение коэффициента сплошности методом РФЭС является актуальной задачей.

В лаборатории «Тонкие и ультратонкие пленки» «НИУ «МЭИ» были исследованы образцы плёнок оксида ванадия, нанесённых на подложку из оксида алюминия. Номинальная толщина плёнки по данным производителя составляет 420 нм. Однако глубина зондирования метода РФЭС для оксидов ванадия оценивается в 16 нм, что значительно меньше заявленной толщины плёнки. Тем не менее, в экспериментальных РФЭС-спектрах были обнаружены вклады от электронов, вылетающих из подложки. Это наблюдение однозначно указывает на то, что исследуемая плёнка оксида ванадия не является сплошной, а имеет неоднородную островковую структуру (рисунок 1).

В данной работе был разработан метод определения коэффициента сплошности поверхности неоднородной пленки методом РФЭС. Разработанный метод позволяет количественно оценивать морфологию тонких плёнок и может быть использован для контроля качества покрытий в микроэлектронике и материаловедении.

Литература

1. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.

З.А. Прудий, студ.; рук. М.Е. Кочетышкин, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВЧ-РАЗРЯДА В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Работа посвящена диагностике параметров плазмы высокочастотного (ВЧ) индуктивного разряда на установке ПЛМ-М, предназначенной для моделирования взаимодействия плазмы с материалами термоядерных реакторов. Основным инструментом исследования является разработанный магнитный зонд (B-dot), представляющий собой индуктивную катушку (16 витков, Ø3 мм) в защитном кварцевом чехле.

В ходе работы проведена абсолютная калибровка измерительного тракта в диапазоне частот 50–300 кГц. Экспериментальные измерения выполнены в стационарном ВЧ-разряде (частота 13,56 МГц) в среде гелия и аргона при давлениях $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ Торр. С помощью автоматизированного координатного механизма получены детальные радиальные профили амплитуды аксиальной компоненты магнитного поля $B_z(r)$ с шагом 10 мм.

Анализ профилей (рис. 1) демонстрирует явный скин-эффект: поле максимально на оси и спадает к периферии. Установлено, что глубина скин-слоя существенно зависит от рода газа: для гелия она составила $\delta \approx 118$ мм, для аргона — $\delta \approx 63$ мм. Меньшая глубина проникновения поля в аргоне свидетельствует о более высокой проводимости плазмы.

На основе уравнений Максвелла [1] восстановлены распределения плотности тока, вихревого электрического поля и проводимости. Оценка концентрации электронов в центре разряда дала значения $n_e \approx 2,0 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ для гелия и $2,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ для аргона.

Выявлены фундаментальные различия в характере энерговклада: в аргоне нагрев локализован в узком пристеночном слое, тогда как в гелии наблюдается объемное поглощение мощности с пиковой плотностью до 34 кВт/м^3 . Полученные данные подтверждают эффективность зондовой диагностики для верификации моделей плазменных процессов.

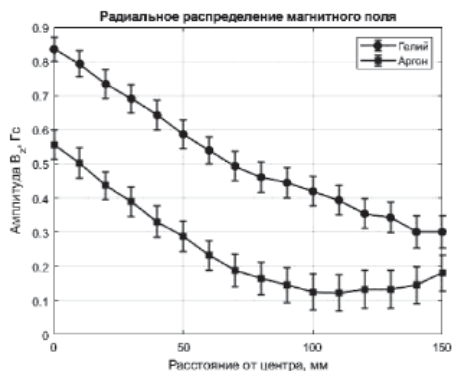


Рис. 1. Радиальное распределение магнитного поля в плазме

Литература

1. Ю. Рихтер, Г. Лохте-Хольтгрёвен. Методы исследования плазмы: Спектроскопия, лазеры, зонды. — Москва: Мир, 1971. — 552 с.

*К.В. Вьюшкова, студ., Н.Е. Балабаев, м.н.с. (ОИВТРАН, Москва),
рук. И.А. Беляев, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ», Москва)*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ СКАНИРУЮЩИМ ЗОНДОМ

В рамках международного проекта ITER ведётся создание экспериментального термоядерного реактора на основе установки типа «токамак». В качестве теплоносителя для таких реакторов перспективны жидкие металлы (ЖМ) благодаря их высокой теплопроводности, высокой температуре кипения и низкому давлению паров [1].

В будущем ЖМ могут быть использованы для охлаждения blankets и дивертора термоядерного энергетического реактора (ТЯР). Однако для реализации ТЯР необходимо детально изучить гидродинамику и теплообмен в условиях, приближённых к реальным [2]. В частности, в ТЯР теплоноситель циркулирует в сильных магнитных полях (МП), что приводит к изменению структуры течения, а термогравитационная конвекция вызывает неоднородность температурного поля, за счёт чего ухудшается теплообмен [3].

В работе рассматриваются результаты исследований коэффициента теплоотдачи (КТО) при течении жидкого металла (ртути) в вертикальном круглом канале при опускном течении, также представлены результаты влияния сильного магнитного поля на локальный коэффициент теплоотдачи. Дополнительно исследовано распределение температуры по окружности канала и получено поле температуры в полярных координатах $T(\varphi)$. Полученное поле демонстрирует выраженную неоднородность нагрева, что подтверждает влияние термогравитационной конвекции и трёхмерных эффектов течения.

Литература

1. NRC «Kurchatov Institute» и др. EXPERIMENTAL THERMONUCLEAR INSTALLATION TOKAMAK T-15MD // Probl. At. Sci. Technol. Ser Thermonucl. Fusion. 2019. Т. 42, № 1. С. 15–38.
2. Свиридов Е.В. Методы и результаты исследования МГД-теплообмена жидкого металла в вертикальных каналах применительно к созданию систем охлаждения термоядерного реактора — ТОКАМАКа.
3. Belyaev I. et al. Temperature fluctuations in a nonisothermal mercury pipe flow affected by a strong transverse magnetic field // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Т. 127. — С. 566–572.

*С.В. Белоусов, асп.; Д.Э. Заварницын, В.М. Мутовалов,
Э.М. Патеев, О.П. Барышническая, студенты;
рук. С.Д. Федорович, д.т.н., проф (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМА-СТЕНКА НА УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Переход к управляемому термоядерному синтезу (УТС) требует разработки новых конструкционных материалов, способных выдержать от единиц до десятков и сотен МВт/м² тепловых потоков на поверхность. Целью проведённого в работе исследования является сравнительный анализ двух подходов к оценке плотности плазменного теплового потока, воздействующего на поверхность мишени. В работе классический метод основанный на одномерном законе Фурье [1] сравнивается с методом, основанным на вычислении скорости нагрева образца [2], который до этого не применялся в условиях мощной плазменной нагрузки.

На базе установки ПЛМ-М в НИУ МЭИ [3] проведен эксперимент по измерению тепловых потоков на мишень. В первом методе тепловой поток определялся из анализа экспериментальной зависимости температуры поверхности от времени по значениям производных на этапе нагрева мишени и охлаждения при двух одинаковых значениях температуры [1]. Второй метод основан на применении закона Фурье для одномерного теплового потока в мишени по значениям температуры, измеренным в двух точках. Проведен сравнительный анализ и найдены условия применимости двух подходов для расчета тепловых нагрузок в условиях стационарного взаимодействия плазмы с материалом стенки. Измерение плазменно-теплового потока в будущем позволит экспериментально определить коэффициент теплопередачи плазмы, а также установить корреляцию между параметрами плазменного разряда и деградацией поверхности мишени.

Литература

1. **Peter R.N. Childs**, Practical Temperature Measurement, University of Sussex, 2001, p314–315.
2. **Kersten H.** et al. The energy balance at substrate surfaces during plasma processing // Vacuum. 2001. Т. 63. к. 3. С. 385–431.
3. **Будаев В.П.** // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. т. 40, вып./3. с.23–36.

Секция 44

ТЕПЛОФИЗИКА

Thermophysics

Председатель секции:

д.ф. -м.н., профессор Синкевич Олег Арсеньевич

Секретарь секции: к.т.н. Глазков Василий Валентинович

И.А. Зубрицкий, асп., рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОВОЙ АККУМУЛЯТОР КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЯУ МБИР

Атомная энергетика сталкивается с проблемой низкой маневренности энергетических установок [1]. Одним из перспективных решений является внедрение систем теплового аккумулирования, позволяющих накапливать избыточную энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в часы пиковых нагрузок.

Исследовательская ядерная установка МБИР представляет собой многоцелевой быстрый реактор с трехконтурной схемой: первый контур с натриевым теплоносителем отводит тепло от активной зоны, второй контур обеспечивает передачу тепла третьему контуру, а третий контур вырабатывает пар для турбоустановки [2].

Предложена конструкция теплового аккумулятора (ТА) для МБИР, которая представлена на рис. 1. Конструкция ТА включает в себя: бак зарядки; бак разрядки; четыре главных циркуляционных насоса (ГЦН); запорную арматуру. В качестве теплоносителя используется расплав соли. Предусматривается три режима работы ТА: режим зарядки; режим разрядки; номинальный режим. Получены оценки массогабаритных параметров ТА, проведено предварительное моделирование режимов его работы.

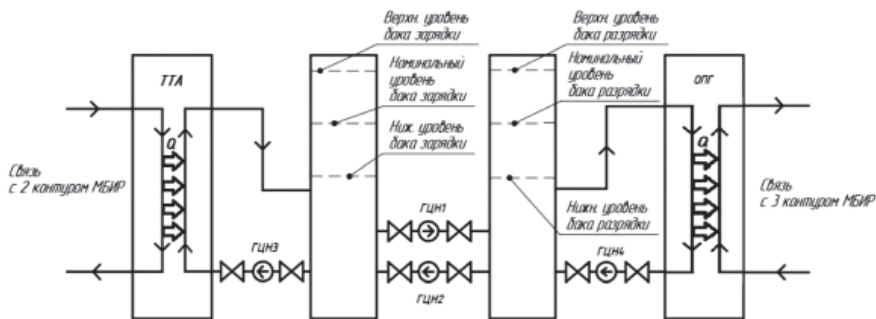


Рис. 1. Схема конструкции теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР

Литература

1. Копкова Е.С., Иманова Х.Г. Атомная энергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы развития отрасли в условиях цифровой экономики // Проблемы региональной экономики. — 2018. — № 42. — с. 3–26.
2. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Лукасевич И.Б. Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) — инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий // Атомная энергия. Том 113, вып. 1. — 2012. — С. 25–28.

А.Ю. Романова, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ КАПЛИ ЛЕГКОКИПАЩЕЙ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ, НАГРЕТОЙ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫШЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДЕЛЬНОГО ПЕРЕГРЕВА ЖИДКОСТИ

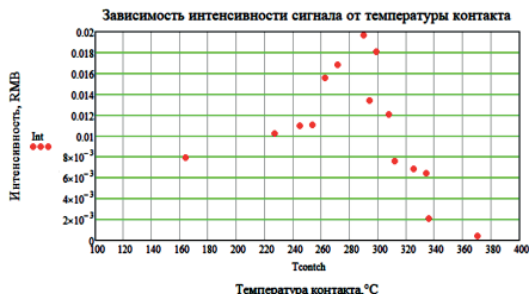


Рис. 1. Зависимость интенсивности сигнала от температуры контакта

существует два сценария. Первый: соприкосновение капли с поверхностью, нагретой до температуры выше насыщения, но ниже температуры Лейденфроста, что сопровождается пузырьковым кипением. Второй: при столкновении с поверхностью, нагретой до температуры выше температуры Лейденфроста, капля «висит» на паровой подушке. Чтобы прояснить эту проблему в данной работе рассматриваются акустические эффекты возникающие при столкновении капли с горячей поверхностью. Предполагается, что между приведенными выше сценариями есть промежуточное состояние: при температурах контакта выше точки Лейденфроста, но ниже температуры предельного перегрева (при которой жидкая фаза становится абсолютно неустойчивой $T_s \approx 325^\circ\text{C}$), происходит соприкосновение капли с поверхностью. Далее происходит перегрев приповерхностного слоя капли, с последующим «взрывным» вскипанием и коротким, интенсивным акустическим сигналом. При температуре контакта выше температуры предельного перегрева, акустический сигнал вовсе практически пропадает. Предполагается что прямой контакт жидкости с поверхностью отсутствует, между ними всегда существует паровая пленка. С целью проверки сформулированной гипотезы на кафедре ИТФ создана экспериментальная установка [2]. Высокотемпературная часть установки (диапазон температур $20...700^\circ$) выполнена из нержавеющей стали 12X18H10T. Низкотемпературная часть (диапазон температур $20...390^\circ$) выполнена из жаропрочного чугуна СЧ-15. Полученная зависимость интенсивности акустического сигнала от температуры контакта на поверхности из СЧ-15 приведена на рис. 1. Результаты подтверждают предполагаемую картину явления.

Литература

1. G. Liang & I. Mudawar. Review of drop impact on heated walls // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016
2. А.Ю. Романова, В.В. Глазков. «Теплофизик 2025» сборник тезисов докладов научно-технической конференции. — М.: Издательство «Перо», 2025. 6–7 мая 2025 г. —

35 с. // <http://thermophys.ru/tpost/gv875pckr1-itogi-konferentsii-teplofizik-2025>
Е.М. Шенягин, асп.; рук. И.А. Беляев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ У ВЕРТИКАЛЬНОГО НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ

В данной работе описано экспериментальное исследование влияния магнитного поля на интенсивность температурных пульсаций (ИТП) при свободной конвекции жидкого металла (ЖМ) — ртути, вблизи вертикального нагретого цилиндра.

Актуальность работы обусловлена развитием гибридных систем «синтез-деление», в которых топливные сборки на основе отработавшего ядерного топлива размещаются в жидкометаллическом бланкете, находящемся в сильном магнитном поле от термоядерного источника. Исследуемая геометрия вертикальный нагретый цилиндр в призматической ячейке является базовой моделью такой сборки.

Экспериментальные данные по ИТП в условиях магнитного поля необходимы для верификации кодов, применяемых при проектировании таких реакторов.

Исследование проводилось на стенде РК-3. Рабочий участок (РУ) представлял собой призматическую полость $56 \times 56 \times 650$ мм, заполненной ртутью. В центре РУ был установлен вертикальный цилиндрический нагреватель. Внешние стенки РУ термостатировались. Измерения выполнялись в четырех сечениях по высоте (110, 210, 310 и 510 мм от нижней стенки (дна) РУ), при варьировании тепловой мощности нагревателя 100, 250, 500 и 750 Вт, и значении магнитной индукции 0, 0.85, 1.7 Тл.

Главным результатом является определение характера подавления ИТП управляемого безразмерным комплексом отношением квадрата числа Гартмана к числу Релея (Ha^2/Ra). Получено, что при достижении значения $Ha^2/Ra \approx 0.25$ происходит резкий переход.

В области ($Ha^2/Ra < 0.25$) ИТП может возрастать более чем в 2 раза относительно ИТП без магнитного поля.

В области ($Ha^2/Ra > 0.25$) ИТП падает до уровня ~ 0.5 от относительно ИТП без магнитного поля. Область роста пульсаций соответствует двумеризации восходящего конвективного потока, последующее падение ИТП связано с полным подавлением турбулентности и стабилизацией потока. Полученное критическое значение Ha^2/Ra определяет границу перехода между этими режимами.

Литература

1. **Moir R.W.** A fusion-driven subcritical nuclear energy system: the fusion-hybrid / R.W. Moir, J.D. Lee [et al.] // *Journal of Fusion Energy*. — 2014. — Vol. 33. — P. 199–203.

Ю.А. Жукова, студ.;
 рук. Д.Н. Герасимов, д.ф.-м.н., зав. каф. (НИУ «МЭИ», Москва)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЕ

Исследуется электрический разряд в одиночной капле жидкости, висящей между двумя электродами. Пробой в подобной геометрии может иметь место как внутри капли, так и вдоль ее поверхности. Примечательно, что электрические параметры разряда в данных случаях отличаются не качественно, а лишь количественно, причем разница их сравнительно невелика, особенно если учесть, что разряд вдоль поверхности капли (рис. 1) имеет несколько большую протяженность; см. ВАХ на рис. 2.

Излучение разряда и в жидкости, и в газе состоит из отдельных вспышек. Динамика излучения при этом различна: разложение интенсивности излучения разряда в жидкости в ряд Фурье представляет собой, фактически, белый шум, в отличие от газового разряда. Можно также отметить, что в спектре излучения разряда в жидкости отсутствуют компоненты, присущие разряду в воздухе.

В целом, проблема соотнесения пробоя жидкости и газа представляется довольно далекой от окончательного решения.



Рис. 1. Пробой вдоль поверхности капли

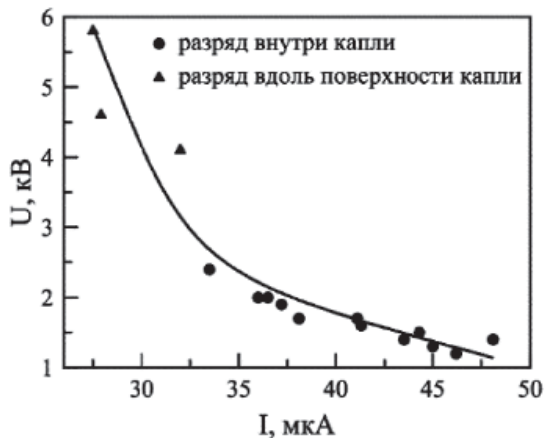


Рис. 2. ВАХ при пробое внутри капли и вдоль ее поверхности

*Д.Д. Дебердеев, студ.; Н.А. Краснов, студ.;
рук. И.А. Молотова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТОЛЕРАНТНОМУ ТОПЛИВУ АЭС

Исследование материалов толерантного топлива (ТТ) для активной зоны водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) представляет собой актуальное направление для повышения ядерной безопасности [1]. При этом одним из ключевых аспектов является изучение теплообмена при охлаждении высокотемпературных оболочек твэлов в условиях повторного залива активной зоны реактора.

Целью работы является экспериментальное исследование закономерностей нестационарного теплообмена при охлаждении модельных образцов из перспективных материалов ТТ в недогретых жидкостях. Анализ литературы подтверждает, что свойства поверхности оболочки твэла значительно влияют на теплообмен в случае аварии с потерей теплоносителя (LOCA), в частности, на температуру перехода от пленочного кипения к интенсивному. Физическое объяснение механизма перехода к высокоинтенсивному охлаждению дается в модели, разработанной в научной группе В.В. Ягова [2], которая позволяет учесть теплофизические свойства жидкостей и материалов, недогрев жидкости и микрогеометрию поверхности.

Эксперименты проводились в герметичном стенде [3] с охлаждением предварительно нагретых до высоких температур (около 600°) цилиндрических образцов (диаметр 10 мм, длина 40–50 мм) из сплава FeCrAl, циркония без и с нанесенным хромовым покрытием различной толщины в недогретой воде при различных давлениях. Установлено, что переход к интенсивному режиму существенно зависит от теплофизических свойств основного материала и защитного покрытия. В дальнейшем планируется проведение экспериментов в водных растворах борной кислоты для имитации условий аварии типа LOCA.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-79-10144.

Литература

1. **Rebak R.B.**, ed. Accident-Tolerant Materials for Light Water Reactor Fuels // Elsevier. 2020. 221 с.
2. **Канин П.К.** О механизме дестабилизации паровой пленки при нестационарном пленочном кипении // ТВТ. — 2023. — Т. 61. — №. 2. — С. 241–250.
3. **Zabirov A.R., et al.** Heat transfer under quenching of cylindrical bodies in subcooled liquids // Nuclear Engineering and Design. — 2021. — Т. 383. — С. 111380.

У.А. Грузинцева, студ.; рук. К. Б. Минко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТОНКИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛЕНОК ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При конденсации пара в каналах наблюдаются различные режимы течения двухфазного потока. В работе [1] представлены данные об изменении толщины плёнки конденсата во времени при конденсации хладагента R245fa в нисходящем потоке в канале диаметром 3,34 мм при массовых скоростях от 50 до 150 кг/(м²·с). Авторы [1] показали, что если при расчёте средней толщины плёнки не учитывать влияние крупных волн, то данные по теплоотдаче хорошо описываются с использованием допущения о линейном профиле температуры в плёнке. Прежде чем моделировать указанную достаточно сложную задачу, представляется важным провести всестороннее тестирование используемого CFD-кода ANES [2] и реализованных в нём алгоритмов на более простых модельных задачах.

Целью настоящей работы являлось предварительное тестирование метода VOF, реализованного в исследовательском коде ANES [2], на задаче течения тонких гравитационных плёнок по вертикальной поверхности при заданном расходе, на который накладываются малые возмущения, приводящие к формированию периодического волнового режима на поверхности плёнки (рис. 1). Полученные результаты расчётов сопоставляются с данными классической работы [3].

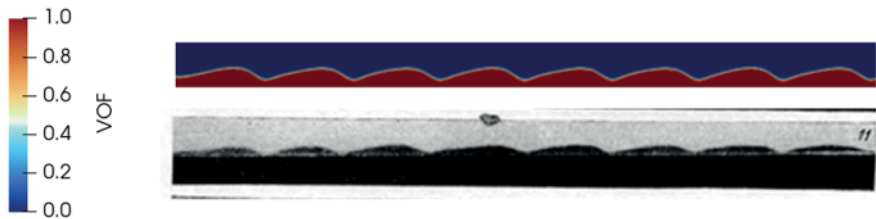


Рис. 1. Периодический волновой режим. Сверху расчет, снизу фотография из [3]

Литература

1. Interfacial waviness during condensation heat transfer / A. Berto, P. Lavieille, M. Azzolin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2116, No. 1. — P. 012014. — DOI 10.1088/1742-6596/2116/1/012014. — EDN UPIXGI.
2. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru/> (дата обращения: 05.11.2025).
3. Капица, П.П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П.П. Капица, С.П. Капица // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1949. — Т. 19, № 2. — С. 105–120. — EDN VIIFHZ.

М.И. Туркина, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОВОЙ АККУМУЛЯТОР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ БРЕСТ-ОД-300

Недостаточная манёвренность атомных электростанций оказывается существенным недостатком, так как график потребления энергии в течение суток не является равномерным. Наиболее перспективным решением проблемы считается интеграция теплового аккумулятора (ТА) в работу АЭС. Это позволит, продолжая работу станции в номинальном режиме, убрать потребность в специальных пиковых установках [1]. В 1980-х годах на строящейся Татарской АЭС уже было предложено использовать ТА, однако, от данной идеи впоследствии отказались [2]. В настоящее время в США компания «TerraPower», начала строительство энергоблока, который включает в себя как реактор на быстрых нейтронах, так и ТА на расплавах солей [3]. В данной работе проведён расчет ТА для экспериментальной ядерной установки БРЕСТ-ОД-300 (рис. 1). За основу конструкции ТА на расплавах солей принят классический пластинчатый теплообменник с противотоком. При этом засыпка в тепловом аккумуляторе играет роль перегородок между потоками.

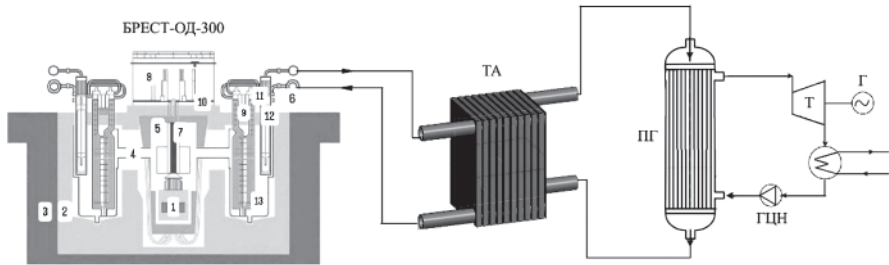


Рис. 1. Технологическая схема АЭС: 1 — активная зона; 2 — блок корпусов; 3 — шахта реактора; 4 — трубопровод коллектора; 5 — корзина активной зоны; 6 — система расхолаживания; 7 — измерительная колонна; 8 — внутриреакторная перегрузочная машина; 9 — парогенератор (ПГ); 10 — верхнее перекрытие; 11 — электронасосный агрегат ГЦН-4000/2; 12 — блок ПГ-ГЦН; 13 — фильтр

Внедрение ТА на АЭС позволит станции работать как минимум в полупиковом режиме графика энергопотребления.

Литература

1. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 272 с.
2. Столяревский А.Я. Атомная энергетика // Альтернативная энергетика и экология. 2005. №3 (23) с.45–48.
3. TerraPower, Natrium <https://www.terrapower.com>

М.В. Тывровский, студ.;
рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЦИРКУЛЯЦИЯ ШАРОВЫХ ТВЭЛ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В данной работе рассматривается циркуляция шаровых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) в активной зоне (АЗ) быстрого реактора с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем. Шаровые ТВЭЛ выбраны таким образом, чтобы в АЗ возникал псевдооживленный слой. На основе [1] выполнен гидродинамический расчет этого слоя. Положение ТВЭЛ в АЗ поддерживается сочетанием сил плавучести и динамического напора восходящего потока теплоносителя. В работе проведено моделирование движения отдельных ТВЭЛ в псевдооживленном слое и расчет поля температур в зоне их ухудшенного теплообмена. Использование плавающих ТВЭЛ способствует решению проблем, связанными с засорением теплообменных каналов продуктами коррозии и обеспечивает дополнительную естественную безопасность реактора. Под активной зоной может быть установлена специальная ступенчатая структура (рис. 1), на которую будут опускаться шаровые ТВЭЛ в случае прекращения циркуляции теплоносителя. АЗ в таком случае естественным образом распадётся, что исключает возможность тяжёлой аварии.

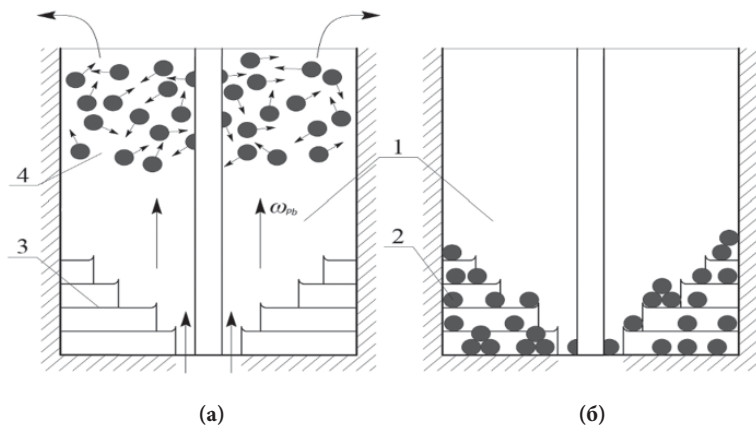


Рис. 1. Активная зона до остановки циркуляции теплоносителя (а) и после (б).

1 — теплоноситель, 2 — шаровой ТВЭЛ, 3 — ступенчатая структура,
4 — псевдооживленная структура

Литература

1. Калекин В.С., Михайлец С.Н. Гидравлика и теплотехника: Учебное пособие. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. — 320 с.

Я.В. Еремин, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦИРКУЛЯЦИИ СРЕДЫ В ГАЗЛИФТНЫХ УСТАНОВКАХ

Газлифтные насосы широко используются в технике, в том числе они могут использоваться в качестве главного насоса атомного реактора на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем типа БРЕСТ. Этому способствует ряд преимуществ газлифта, к которым можно отнести долговечность, надежность и простоту конструкции. Упрощенная схема газлифтной установки показана на рис. 1. На кафедре ИТФ МЭИ создана модельная газлифтная установка, осуществляющая циркуляцию двухфазной среды в газлифтном контуре. На установке была проведена серия экспериментов по измерению параметров двухфазного потока. Создана математическая модель, описывающая процесс движения двухфазного потока в установке с точки зрения закона сохранения энергии. Модель учитывает диссипацию энергии при подъемном движении пузырьков газа.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты были сопоставлены с различными методиками, предложенными отечественными и зарубежными исследователями [1, 2]. Полученные результаты (рис. 2) качественно и количественно близки к экспериментальным данным.

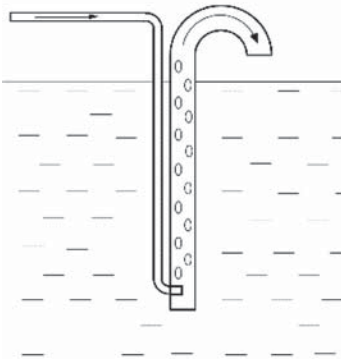


Рис. 1. Газлифтный контур

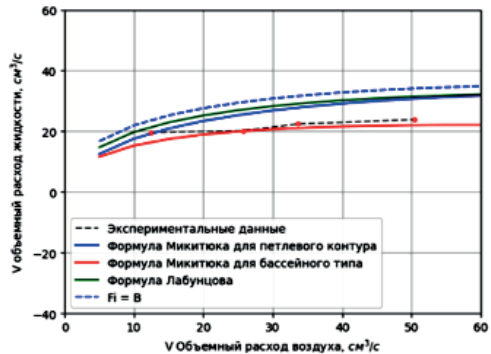


Рис. 2. Результаты моделирования

Литература

1. Mikityuk K. Development of a Drift-flux Model for Heavy Liquid Metal/ Gas Flow // J. Nuclear science and technology. V. 42. N. 7, p. 600–607. (July 2005).
2. Stenning A.H., Martin C.B., An analytical and experimental study of air-lift pump performance//Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 90, no. 2, pp. 106–110, 1968, doi: 10.1115/1.3609143

А.М. Атаева; рук. А.И. Чурилов (НИКИМТ, Москва)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Безопасность эксплуатации высокотемпературного оборудования зависит от эффективности тепловой изоляции. Обычно проектирование теплоизоляционной конструкции основывается на приближенных оценках физических процессов. Подробный анализ теплопереноса способствует повышению эффективности теплоизоляции.

В настоящей работе рассмотрены три составляющие процесса теплопередачи: конвекция, кондукция и теплообмен излучением. Показано, что основным механизмом теплопередачи при высоких температурах является излучение [1]. Для минимизации радиационной составляющей теплового потока предложено использовать экранирующую теплоизоляцию, принцип действия которой основан на отражении падающего излучения [2]. Для обеспечения достаточного термического сопротивления предложена комбинированная многослойная теплоизоляция, в которой между экранами заложен слой теплоизолятора, рис. 1.

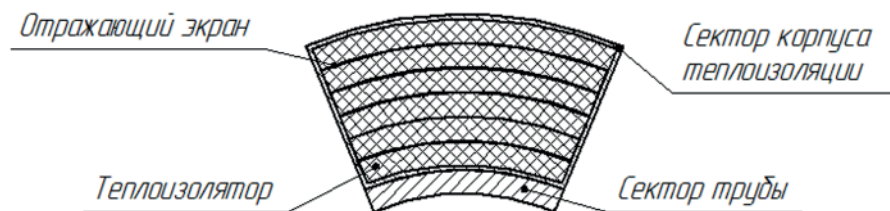


Рис. 1. Конструкция комбинированной теплоизоляции

В программном комплексе ANSYS проведены расчеты экранирующей теплоизоляции для нескольких форм экрана с различной излучательной способностью покрытия. Получены наиболее эффективные способы укладки слоев в комбинированной многослойной теплоизоляции. Результаты могут быть полезны при проектировании тепловой изоляции для высокотемпературных объектов современной энергетики.

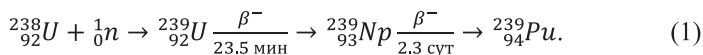
Литература

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник // М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Daryabeigi K., Miller S.-D., Cunningham G.-R. Heat transfer in high-temperature multilayer insulation // 5th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures, 2006.

А.А. Толпегин, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ДВУХМЕРНОЕ МНОГОГРУППОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ВОЛНЫ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ TWR

Реактор бегущей волны (Traveling wave reactor или TWR) [1] является одним из вариантов реакторов поколения 4. Данная модель реактора отличается от других крайне долгой топливной кампанией, составляющей ~30–50 лет без необходимости перегрузки свежего топлива, локализацией движущейся области протекания цепной реакции деления (нейтронно-делительной волны), а также возможностью работы исключительно на ^{238}U изотопе урана по следующему каналу реакции:



В данной работе рассматривается задача моделирования фронта нейтронно-делительной волны и ее миграции по активной зоне (далее АЗ). Расчеты производились в 5-ти групповом энергетическом приближении для двухмерной расчетной области в диффузионном приближении с учетом запаздывающих нейтронов и изменяющегося изотопного состава АЗ.

Расчетная модель реактора TWR, рис. 1, представляется в виде цилиндра, заполненного ^{238}U (1). Снаружи вся АЗ окружена отражателями (2), для снижения потерь нейтронов. Для начала реакции на конце АЗ организуется запальная зона (4), представляющая из себя закладку с обогащенным ураном. После начала реакции в закладке иницирующие нейтроны поступают в соседние слои основного топливного материала, вызывая процесс наработки делящегося изотопа ^{239}Pu и формирования фронта волны деления (3). Нарбатываемый в ходе реакции плутоний является основным источником новых нейтронов и вторичным топливом, позволяющим повысить глубину выгорания исходного топливного сырья.

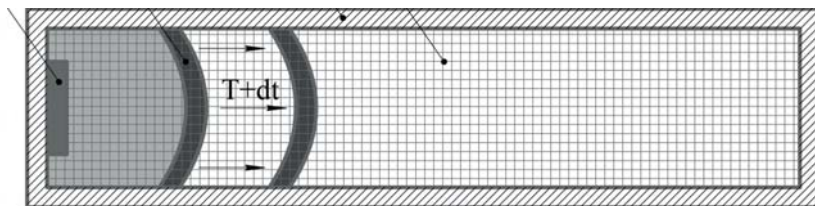


Рис. 1. Расчетная модель реактора TWR

Литература

1. А.Е. Помысухина, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев Реактор с быстрым спектром нейтронов на основе волны ядерного горения в торий-урановом топливном цикле // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2020. — № 1. — С. 37–48. — DOI 10.26583.

Н.А. Краснов, студ.; Д.Д. Дебердеев, студ.;
рук. И.А. Молотова, доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО РЕЖИМА КИПЕНИЯ

В работе представлено сравнение экспериментальных тепловых потоков в пленочном режиме кипения при охлаждении горячих тел в недогретых жидкостях, полученных в программе «Ansys Fluent» при решении обратной задачи теплопроводности, с расчетами по различным теоретическим моделям пленочного кипения [1–4] (пример расчетов представлен на рисунке). Результаты демонстрируют хорошее согласие опытных данных с расчетом по разработанным в научной группе моделям [1, 2], средняя погрешность не превышает 30% и 18%, соответственно.

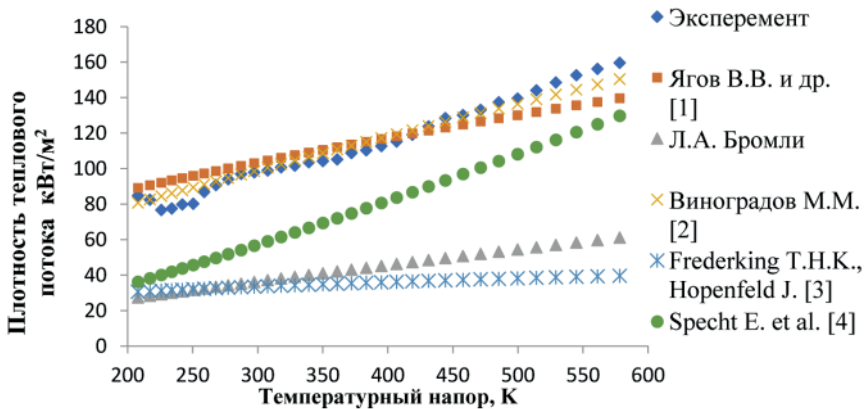


Рис. 1. Зависимости плотности теплового потока от температурного напора, полученные в эксперименте и рассчитанные по различным теоретическим моделям для охлаждения никелевого цилиндра в воде с недогревом 10 К

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-79-10144.

Литература

1. Ягов В.В. и др. Теплообмен при пленочном кипении недогретых жидкостей: новые экспериментальные результаты и расчетные уравнения // ИФЖ. 2017. Т. 90. С. 266.
2. Виноградов М.М. и др. Закономерности устойчивого пленочного кипения недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2024. №. 9. С. 50.
3. Frederking T.H.K., Hopenfeld J. Laminar two-phase boundary layers in natural convection film boiling of subcooled liquids // ZAMP. 1964 V. 15 № 4. P. 388.
4. Specht E., Jeschar R., Heidt V. An analytical model for free convection film boiling on immersed solids // Chem. Eng. Process.: Process Intensification. 1992 T. 31 №. 2. С. 137.

М.И. Чернышова, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ГАЗА И ЖИДКОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ УДАРЕ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ О ПОВЕРХНОСТЬ

Картина, обычно рассматриваемая в литературе при ударе воздушной струи о поверхность жидкости [1], [2], предполагает равномерное растекание струи, рис. 1.

Однако проведенное нами исследование демонстрирует другую картину. При натекании затопленной струи на поверхность жидкости [3] при диаметре сопла d от 1 до 5 мм и скорости струи u , достигаемой на срезе сопла, от 5 до 180 м/с фиксируется возникновение вихревых структур в пограничном слое. Выяснено, что для одиночной струи возникающие в поверхностном слое жидкости течения имеют конфигурацию седловой точки с центром, совпадающим с центром воздушной каверны, рис. 2. Данное течение обладает большой устойчивостью и не меняет радикально свой характер и в случае, когда несколько струй находятся в непосредственной близости.

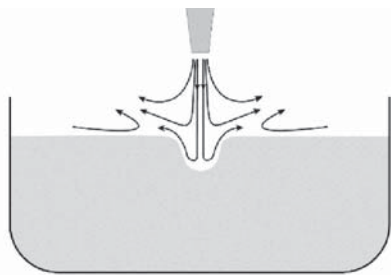


Рис. 1. Линии тока при натекании струи газа на поверхность жидкости (стандартная картина)

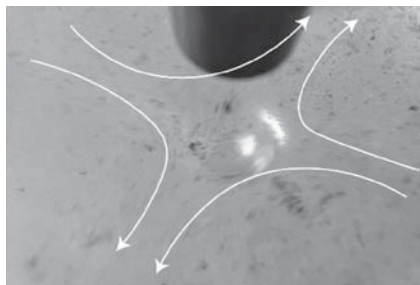


Рис. 2. Направление течения жидкости в приповерхностном слое при аномальном характере взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости

Данное явление важно для применения в металлургии, где струи кислорода бьют непосредственно о поверхность расплава.

Литература

1. Miguel A. Barron, Dulce Y. Medina, Joan Reyes, Interaction between a Liquid Surface and an Impinging Gas Jet, World Journal of Engineering and Technology, 2021, 9, 793–803.
2. Ho Yong Hwang, A study of impinging gas jets on liquid surfaces, 2008.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч.1. — 5-е изд. перераб. и доп. — М.: Наука, 1991. С. 361–376.

В.А. Березин, студ.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

В гидродинамике исследование процесса перехода от ламинарного к турбулентному течению остается актуальным по причине того, что, физические механизмы инициирования перехода в другую форму течения до сих пор не до конца ясны. Понимание процесса изменения характера течения способно помочь разработке упрощенных моделей, которые смогут описывать неустойчивое течение при критических числах Рейнольдса.

Один из способов анализа свойств переходного режима является прямое численное моделирование (DNS), разрешающее вихревую структуру турбулентности. В данной работе проведено DNS моделирование переходного течения в круглой трубе. Для этого использовался код Fortran, разработанный Д. Красновым [1]. Параметры расчетной сетки, а также форма и размеры возмущений заданы на основе данных из работы [2]. После наложения начальных возмущений были смоделированы перемежающиеся структуры и их эволюция во времени. Исследовалась неоднородность структуры, приведены результаты моделирования течения при различных числах Рейнольдса и анализ статистических параметров течения, а именно построение корреляционной функции в пространстве и во времени флуктуаций скорости, что является важным инструментом анализа поведения данной системы. Для этого разработан код на Python, который осуществляет визуализацию данных расчета и статистический анализ параметров течения.

Результаты текущей работы дополняют уже имеющиеся данные перемежающегося течения в круглой трубе [3]. Они позволят в дальнейшем разработать и верифицировать модели переходного процесса. Этот является основой для создания более точных полуэмпирических моделей турбулентности, что имеет прикладное значение для задач теплофизики.

Литература

1. **Dmitry K., Oleg Z., Thomas B.** Comparative study of finite difference approaches in simulation of magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds number // *Computers & Fluids* 2011.
2. **Никитин Н.** Проблема перехода и локализованные турбулентные структуры в трубах // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2021, № 1, с. 32–46.
3. **В.А. Березин, Я.И. Листратов.** Прямое численное моделирование переходных течений в круглой трубе // «Теплофизик 2025» сборник тезисов докладов научно-технической конференции. — М.: Издательство «Перо», 2025. 6–7 мая 2025 г. — 35 с. // <http://thermophys.ru/tpost/gv875pckr1-itogi-konferentsii-teplofizik-2025> [Электронное издание].

Е.А. Лапутина, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КРУПНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ ИХ ИСПАРЕНИИ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

Электризация капель в грозовых облаках — процесс, являющийся одной из центральных тем в области атмосферной физики. Несмотря на современные исследования, точного ответа, как электризуются капли, нет. Предложено множество возможных механизмов зарядки капель в грозовом облаке, однако мнения экспертов, какой из них играет большую роль, расходятся [1]. В данной работе предложена модель электризации капель в грозовых облаках, схожая с моделью, предложенной в [2]. Рассматривается двухпотоковая схема движения, в которой мелкие капли увлекаются восходящим потоком вверх, а крупные падают вниз. Предполагается, что при наличии электрического поля падающие вниз капли поляризуются, и в верхней её образующей скапливается положительный заряд, а в нижней — отрицательный. При этом из-за неравномерности испарения с поверхности капли неравномерно будет стекать и электрический заряд (рис.1). Нескомпенсированный заряд капли будет расти до тех пор, пока создаваемое им электрическое поле не ослабит внешнее настолько, что стекающие за счет испарения с поверхности капли положительные и отрицательные заряды не уравниваются друг друга. На основе разработанной модели определён предельный заряд капель, ток зарядки ячейки грозового облака, время зарядки ячейки до следующего разряда молнии. Полученные величины соответствуют экспериментально наблюдаемым значениям [1]. Для подтверждения нашей гипотезы на кафедре ИТФ проводится ряд экспериментов по определению интенсивности испарения легких аэроионов с поверхности жидкости в электрическом поле. Интенсивность испарения легких аэроионов определяется через фиксацию времени рекомбинации единичных тяжелых аэроионов над поверхностью жидкости.

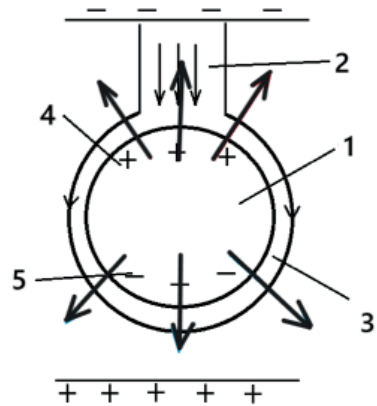


Рис. 1. Механизм электризации капель при их неравномерном испарении.
1 — крупная капля; 2 — турбулентная тень; 3 — пограничный слой; 4 — стекание отрицательного заряда; 5 — стекание положительного заряда

Литература

1. Мучник В.М. Физика грозы. СПб.: Гидрометеиздат, 1974. с. 352.
2. В.А. Саранин, О возможности левитации капель в атмосфере при их индукционной зарядке в электрическом поле в условиях неоднородного испарения // ЖТФ, 1998, том 68, выпуск 2, 16–21.

*В.А. Федашков, О.В.Страшникова, студ.; А.С. Киселев, асп.;
рук. Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

СТРУЙНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЦОД

В современных центрах обработки данных (ЦОД) рост вычислительных мощностей ведет к увеличению тепловыделения и энергозатрат на охлаждение. До 40% всей потребляемой энергии расходуется на поддержание температурного режима, поэтому повышение эффективности систем теплоотвода становится приоритетной задачей их развития.

В работе [1] исследовано влияние высоты канала на коэффициент теплоотдачи при ламинарном течении воды над поверхностью кристалла. При высоте канала 50 мкм и конвективном охлаждении коэффициент теплоотдачи достигает 50 кВт/(м² К). Однако высокие гидравлические потери ограничивают его применение на практике. В работе [2] показано, что нанотрубки приводят к двухкратному росту конвективного коэффициента теплоотдачи.

В работе исследуется интенсификация теплообмена при струйном охлаждении высокопроизводительных микросхем в системах ЦОД. Для интенсификации теплообмена при струйном натекании рассматривается применение турбулизаторов потока и структурирование поверхности. Как первый шаг для интенсификации теплообмена предполагается применить наножидкость. С этой целью в охлаждающую жидкость добавляются углеродные нанотрубки. Струйное охлаждение позволяет направлять поток на наиболее теплонагруженные зоны кристалла, что повышает эффективность отвода тепла.

Литература

1. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008, Стр. 539.
2. Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Минаков А.В. Моделирование и интенсификация конвективного теплообмена наножидкостями с углеродными нанотрубками. ИФЖ. 2025. Т. 98. № 2, 420–432.

А.А. Опросичев, студ.; К.Б. Минко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПЛЁНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ПАРОМ

Точность определения перепада давления при плёночной конденсации насыщенного пара в трубных пучках существенно влияет на корректность оптимизации параметров проектируемых конденсаторов [1]. Целью настоящей работы является рассмотрение модельной задачи о влиянии плёночной конденсации на гидродинамические характеристики при вынужденном обтекании одиночного цилиндра насыщенным паром.

В настоящей работе анализируется постановка задачи из работы [2], в которой представлены результаты расчетов конденсации R-113 на горизонтальном цилиндре диаметром 12.5 мм. Модель [2] была верифицирована с использованием данных о средней интенсивности конденсации на поверхности цилиндра, при этом гидродинамические характеристики в работе не рассматриваются.

Для примера на рис. 1 представлено распределение коэффициента давления по поверхности цилиндра при скорости набегающего потока насыщенного пара R-113 равной 1 м/с (число Рейнольдса 8300). Температурный напор при конденсации равен 20 К. Все расчеты выполнены с использованием CFD-кода ANES [3].

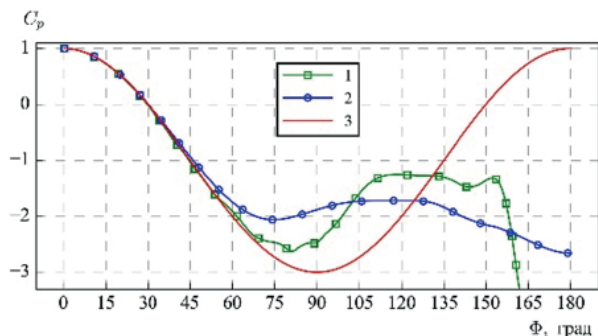


Рис. 1. Распределение коэффициента давления по поверхности цилиндра при $Re_v=8300$.

1 — при конденсации, 2 — однофазное обтекание, 3 — идеальная жидкость

Литература

1. Оптимизация параметров высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов / О.О. Мильман, А.Ю. Картуесова, В.С. Крылов [и др.] // Теплоэнергетика. — 2021. — № 12. — С. 62–67. — DOI 10.1134/S0040363621120067. — EDN JPFJCY.
2. Моделирование процессов конденсации насыщенного пара из нисходящего потока на поверхности горизонтальной трубы методом VOF / К.Б. Минко, В.И. Артемов, А.А. Клементьев, С.Н. Андреев // Теплоэнергетика. — 2023. — № 12. — С. 31–46. — DOI 10.56304/S004036362312010X. — EDN VRUGNO.
3. Код ANES [электронный ресурс]. URL: <https://anes.ch12655.tmweb.ru/>

В.М. Максименко, студ.;
рук. В.В. Глазков, к.н.т., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ И ГРАДИН, ПАРЯЩИХ НАД НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В РЕЖИМЕ ЛЕЙДЕНФРОСТА, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕОРИЯМ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ

Процессы электризации и связанные с ними грозовые явления представляют интерес для изучения [1]. Среди существующего множества механизмов электризации (более 13) существенную роль занимает электризация при столкновении капель друг с другом и капель с градинами. Изучение процессов взаимодействия происходит с помощью различных методов [2]. В данной работе описана существенно новая методика столкновения капель и градин.

Методика исследования заключается в том, что капля или градина, парящая над нагретой поверхностью в режиме Лейденфроста, сталкивается с каплей, инжектируемой со скоростью до 1,5 м/с. Это соответствует числам Вебера в диапазоне от 0 до 100. Возможные исходы столкновения включают упругое и неупругое столкновение и слияние (коагуляцию).



Рис. 1. Модель градины (1 — твердая сфера, покрытая слоем жидкости, 2 — нагретая поверхность)

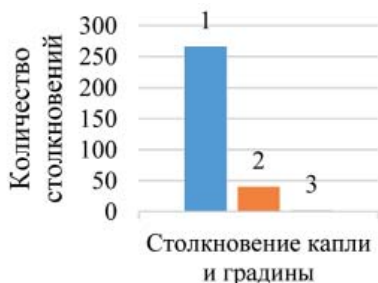


Рис. 2. Результаты экспериментов (коагуляция (1), упругое (2) и неупругое (3) столкновение)

В качестве вывода можно указать, что более 99% столкновений капель друг с другом и градины с каплей в диапазоне $We < 100$ заканчиваются их слиянием. Из этого следует, что механизмы электризации, в которых главную роль играют столкновения, по всей видимости не оказывают влияние.

Литература

1. Мучник В.М. Физика грозы. СПб.: Гидрометеиздат, 1974 г. с. 352.
2. S.G.Bradley, C.D.Stow. Collision between liquid drops//. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Sci. 1978.

Д.М. Баранова, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ВАЛИКОВЫХ СТРУКТУР НА ПРОЦЕСС ЗАКРУТКИ БОЛЬШИХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

Одним из основополагающих процессов, влияющих на формирование погодного фронта, является механизм образования больших атмосферных вихрей, в том числе циклонов и антициклонов. Основной причиной их возникновения называют взаимодействие холодного и теплого атмосферных фронтов, при котором часть теплого фронта проникает внутрь холодного, и в результате возникающего естественно-конвективного движения теплый воздух поднимается вверх. Основным механизмом закрутки таких вихрей, как обычно предполагается, является сила Кориолиса, которая отклоняет движение воздушных масс, вовлекая весь поднимающийся воздух во вращательное движение. Однако наблюдаемую высокую интенсивность закрутки вихрей этот механизм, по всей видимости, не объясняет.

В данной работе рассматривается закрутка больших вихрей за счет самоорганизации валиковых конвективных структур, ориентированных по направлению к центру вихря, перпендикулярно направлению закрутки. Эти вихри возникают в приземном пограничном слое. Для больших вихрей типа циклонов эти вихри возникают за счет термической конвекции и имеют вид конвективных валов. Для мезомасштабных вихрей типа торнадо такие же вращающиеся валики возникают под действием сил инерции (т.н. вихри Тейлора-Гертлера), возникающие между вращающимися цилиндрами и при обтекании потоком лобовой части выпуклых тел. Данная задача также эквивалентна задаче о возникновении конвективных валов [1]. В работе оценивается возможное влияние предлагаемого механизма закрутки на процесс образования циклонов и торнадо.

На установке, созданной на кафедре ИТФ МЭИ, в рамках рассмотрения предлагаемого механизма закрутки вихрей, проведено исследование конвективных структур в виде нестационарных всплывающих термиков, стационарных гексагональных ячеек Рэлея-Бенара и конвективных валиков.

Литература

1. **Линь Цзя Цао.** Теория гидродинамической устойчивости. М.: Издательство иностранной литературы. 1958. 194 с.

*В.В. Кунецкий, О.В. Страшникова, А.В. Романюк,
А.В. Федашков, С.А. Городова, студенты; А.С. Киселев, асп.;
рук. Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ И ИХ АГЛОМЕРАТОВ

В работе [1] показано, что при кипении воды в микроканале с размерами $0.2\text{ мм} \times 3\text{ мм} \times 13.7\text{ мм}$ с покрытием из наночастиц оксида алюминия, критическая тепловая нагрузка повышается в исследованных условиях на 50%. Но автор не изучил влияния характеристик покрытия и обработки поверхности, на которую оно наносится.

В настоящей работе исследовано смачивание покрытия из наночастиц карбида кремния и их агломератов с размерами 50–250 нм, наносимого на медную пластину. Выбор наночастиц карбида кремния обусловлен их высокой прочностью, устойчивостью к окислению, теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения.

В опытах измерены высота подъёма жидкости и распределение краевых углов на поверхности покрытия из наночастиц карбида кремния и их агломератов, наносимых на медное основание с различной исходной шероховатостью. Данные о смачиваемости покрытия необходимы для выбора его оптимальных характеристик.

Высота подъёма жидкости измерена путём погружения в неё образца — медной пластины с исследуемым покрытием. Краевые углы на поверхности измерялись согласно методу сидячей капли в выбранных точках, расстояние между которыми составляло 3 мм.

Наибольшая высота подъёма жидкости получена для образца, обработанного наждачной бумагой P1200 и покрытого десятью слоями наночастиц карбида кремния и их агломератов, и она равна 24 мм. Краевой угол в этом случае практически близок к нулю. Это гидрофильное покрытие обеспечивает подтекание жидкости в осушенные участки и задерживает возникновение кризиса теплообмена. Если поверхность основания отполировать и нанести шесть слоев наночастиц карбида кремния и их агломератов, высота подъёма жидкости близка к нулю, а краевой угол в отдельных точках увеличивается до 170 градусов.

Таким образом, в зависимости от обработки поверхности основания и количества слоёв наночастиц карбида кремния и их агломератов покрытие может быть гидрофильным или гидрофобным.

Литература

1. **Шустов М.В.** Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц: автореферат дис. к.т.н.: 01.04.14 / — Москва, 2015. — 20 с.

А.П. Журило, студ.; рук. Т.А. Губанова, асп. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТЕЛ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕЙ ЖИДКОСТИ

Метод затопленно-струйного охлаждения является одним из передовых в настоящее время. При полном погружении детали в охлаждающую жидкость интенсивность ее охлаждения усиливается за счет направленного потока той же жидкости, подаваемого под давлением через сопло. Струя механически разрушает паровую пленку и, в результате ее формирования внутри охлаждающего объема, температура жидкости остается такой же, а ее свойства не меняются, как при свободной струе, которая испаряется или нагревает окружающую среду [1].

Физические параметры, влияющие на интенсивность охлаждения закаливаемых изделий представлены в монографии [2]. Среди них: свойства жидкостей и поверхностей, масштаб шероховатости и недогрев. Показано, что при охлаждении в недогретой воде (температура ниже температуры насыщения T_s) пленочное кипение становится неустойчивым: даже слабые возмущения — например, естественное перемешивание или введение струи — могут вызывать локальное смачивание поверхности и переход к интенсивному пузырьковому режиму. Эксперименты с управляемой инъекцией воды показывают, что существует критическая скорость возмущения, при которой дестабилизация паровой плёнки достигает максимума, а ниже определённой температуры жидкости даже минимальные возмущения приводят к разрушению плёнки.

В нашей работе представлены новые результаты экспериментального исследования с охлаждением шаров из никеля при воздействии струи в различных жидкостях при разных недогревах до температуры насыщения. Также использование устройства для впрыска с регулируемым ходом поршня позволило изменять скорость струи и оценить её влияние на устойчивость паровой пленки.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-79-10144).

Литература

1. **Кобаско Н.И.** Закалка стали в жидких средах под давлением. — Киев: Наукова думка, 1980. — 224 с.
2. **Liscić B.** Quenching Theory and Technology / edited by B. Liscić, H.M. Tensi, L.C.F. Canale, G.E. Totten. — Boca Raton: CRC Press, 2010. — 688 p.

*Н.П. Сизинцев, Л.Г. Полянский,
Н.Д. Нечаев, Д.Н. Попов, студенты;
рук. Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРАЕВЫХ УГЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОФОБНОЙ ПЛАСТИНЫ

В работе [1] показано, что теплоотдача при капельной конденсации определяется распределением капель по размерам. Причем максимальный диаметр капли равен отрывному и уменьшается с увеличением краевого угла. Капли при достижении отрывного диаметра стекают с поверхности, чем могут определяться пульсации теплового потока и температуры стенки, согласно работе [2]. Краевой угол может быть неравномерно распределен на поверхности, что может определять размеры капель и, соответственно, теплоотдачу и пульсации теплового потока и температуры стенки.

В данной работе было измерено распределение краевых углов на поверхности из нержавеющей стали с комбинированным гидрофобным покрытием. Это покрытие было получено в работе [3] формированием микроканалов (радиус 0.1 мм) на поверхности подложки и нанесением наночастиц оксида алюминия (характерный размер 150 нм). Измерения проводились по методу лежащей капли.

В результате измерений получено, что краевой угол неравномерно распределен на поверхности подложки. При этом существуют как участки с максимальным краевым углом — 148° , так и с минимальным краевым углом — 130° .

С помощью полученного распределения краевого угла на поверхности можно предсказать распределение капель по размерам и отрывной диаметр капли, а затем определить теплоотдачу и пульсации теплового потока и температуры стенки. Это возможное направление наших дальнейших исследований.

Литература

1. **В.П. Исаченко, А.П. Солодов.** Асимптотический анализ капельной конденсации, ТВТ, том 22, № 5, 1984 г.
2. **Зайнуллина Э.Р.** Градиентная теплотометрия в исследовании теплообмена при конденсации пара на наружной поверхности трубы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2019 г.
3. **Н.С. Иванов.** Интенсификация теплообмена в термосифоне с помощью покрытий из микро- и наночастиц. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2024 г.

М.М. Аляутдинова, студ.; рук. Н.С. Иванов, к.т.н., доц.

ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАНИЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ

Конденсация — один из основных теплообменных процессов в энергетике. Большое количество энергии, выделяющееся при конденсации, позволяет эффективно отводить тепло в конденсаторах ТЭЦ и АЭС. Сам процесс может протекать в двух режимах: капельном, когда жидкость собирается в отдельные капли, и пленочном, при котором образуется сплошной слой конденсата.

Известно, что капельная конденсация более эффективна, чем пленочная, однако она продолжает преобладать в теплообменном оборудовании в связи с высокой устойчивостью пленочного слоя и низкой надежностью гидрофобных покрытий [1].

В работе исследовано смачивание гидрофобных и гидрофильных покрытий и их влияние на теплоотдачу при конденсации. Разработана экспериментальная установка для исследования теплообмена при конденсации на различных поверхностях с возможностью визуализации процесса в инфракрасном спектре.

Разработан способ формирования супергидрофобного покрытия, которое позволяет увеличить краевой угол до 171° . Показано влияние разработанного покрытия на стабилизацию капельной конденсации (рис.1). Установлено, что применение данного покрытия увеличивает теплоотдачу при конденсации водяного пара до 3-х раз в широком диапазоне параметров: газосодержание 2–50%, плотность теплового потока $0,2\text{--}16,5 \text{ кВт/м}^2$, температурный напор $1\text{--}27^\circ\text{C}$.

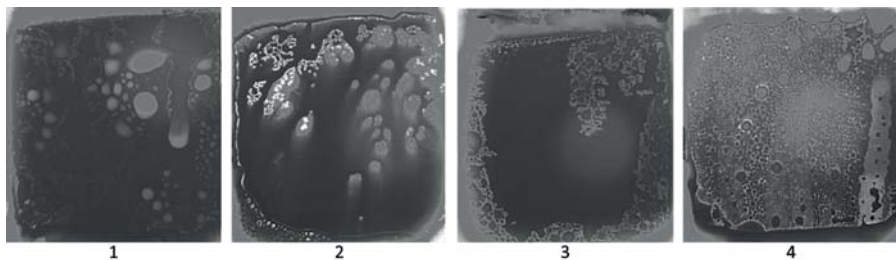


Рис. 1. Конденсация водяного пара, плотность теплового потока 15 кВт/м^2 на поверхности:
1 — чистая медь, 2 — медь с гидрофильным покрытием, 3 — медь с микроструктурой
в виде впадин 80 мкм , 4 — медь с супергидрофобным покрытием

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №25-79-00094)

Литература

1. Kuzma-Kichta, Y.A., Ivanov, N.S., Lavrikov, A.V. et al. «Intensification of Heat Transfer During Boiling and Condensation by Means of Micro- and Nanoparticle Coatings» // J Eng Phys Thermophys. — 2023. — Т. 96. — № 2. — С. 344–348.

*А.В. Романюк, студ.; А.Д. Потехин, студ.;
рук. Ю.А. Кузма-Кичта, проф., д.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОСИФОНА ПРИ НАНЕСЕНИИ В ИСПАРИТЕЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Россия активно занимается освоением районов вечной мерзлоты, но из-за различных антропологических факторов происходит её таяние, что приводит к нарушениям в работе инфраструктуры. Для решения данной проблемы предлагается использовать термосифоны, которые будут отводить тепло от грунта в окружающую среду.

В работе исследуются методы уменьшения термического сопротивления: улучшение циркуляции теплоносителя в испарителе и нанесение комбинированных покрытий. Рассмотрены следующие покрытия: микропористые покрытия, покрытия, состоящие из впадин, слоя наночастиц и гидрофобизатора и покрытия из проволочной спирали со слоем наночастиц.

Влияние добавления осевой вставки в испаритель термосифона определено экспериментальным путём. Эффект от микропористого покрытия будет оценен расчётным путём с использованием формулы Кузма-Кичта Ю.А. Покрытие из впадин, слоя наночастиц и гидрофобизатора позволило уменьшить термическое сопротивление в 2,4 раза.

Литература

1. Международная научно-практическая конференция «Управление тепловым режимом мёрзлых грунтов» МГУ, 10 апреля 2024 год, Москва.
2. **Иванов Н.С.**, Интенсификация теплообмена в термосифоне с помощью покрытий из микро- и наночастиц // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ». — 2024. — С.122.
3. Исследование транспортных свойств испарителя модели термостабилизатора с различной структурой поверхности / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, Ю.П. Штефанов [и др.] // Тепловые процессы в технике. — 2016. — Т. 8, № 9. — С. 395–400. — EDN WNFDPV.
4. **Кузма-Кичта Ю.А.** Методы интенсификации теплообмена на макро-, микро- и наномасштабах: учебное пособие / Ю.А. Кузма-Кичта. — М.: Издательство МЭИ, 2013. — 124 е.: ил.

И.А. Воробьев, студ.; рук. Н.С. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЧИВАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ЛЕЙДЕНФРОСТА

Эффект Лейденфроста связан с достижением критической плотности теплового потока при интенсивном переходном кипении жидкости, что имеет ключевое значение для интенсификации теплообмена в энергетических установках и ядерных реакторах. В условиях аварийного охлаждения перегретых поверхностей температура Лейденфроста ограничивает эффективность теплоотдачи.

Изменение структуры поверхности позволяет создавать гидрофобные и гидрофильные покрытия. Гидрофобные покрытия увеличивают краевой угол смачивания и снижают контакт жидкости с поверхностью, тогда как гидрофильные покрытия улучшают транспорт теплоносителя и его подвод к «сухим» зонам.

В настоящей работе проведено исследование смачивания гидрофобных и гидрофильных поверхностей (рис. 1) и их влияния на температуру Лейденфроста. Получены экспериментальные данные по краевым углам и капиллярному подъему для покрытий, выполненных из канавок и наночастиц оксида алюминия, а также впадин и наночастиц углерода. Установлено, что формирование гидрофильного покрытия усиливает транспорт дистиллированной воды по поверхности. Обнаружено, что изменение смачиваемости поверхности чистой меди оказывает влияние на температуру Лейденфроста.

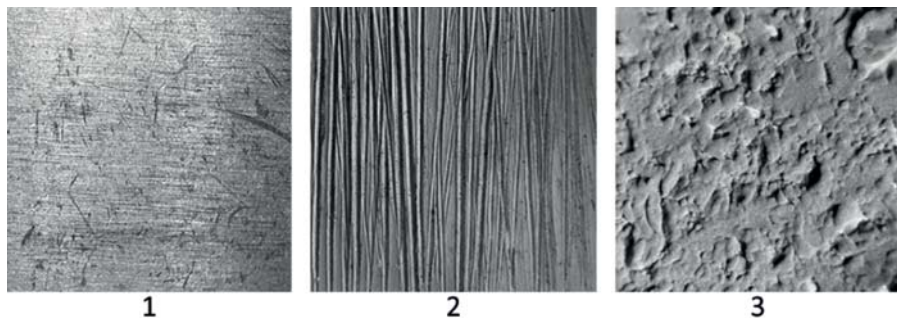


Рис. 1. Исследованные поверхности: 1 — чистая медь, 2 — медь с нанесенным гидрофильным покрытием из наночастиц оксида алюминия и канавок, 3 — медь с нанесенным супергидрофобным покрытием из наночастиц углерода, впадин и слоя синтетического масла

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25–79–00094)

Литература

1. Kuzma-Kichta, Y.A., Ivanov, N.S., Chugunkov, D.V. et al. «Wetting of Hydrophobic and Hydrophilic Coatings» // J Eng Phys Thermophy. — 2021. — Т. 94. — № 6. — С. 1583–159.

*М.В. Лоцманов, Д.А. Чижиков студ.; Р.Ф. Рахимов асп.;
рук. И.А. Беляев, к.т.н., доцент (МЭИ, Москва)*

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ В БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

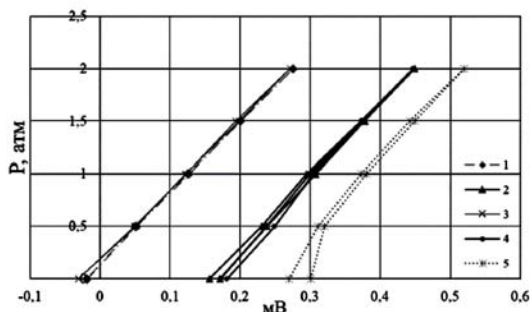


Рис. 1. Калибровка Kistler 601A: 1 — без магнитного поля, 2 — в МП ($B = 1$ Тл), 3 — сразу после отключения магнитного поля, 4 — повторно в МП ($B = 1$ Тл), 5 — в магнитном поле ($B = 1,7$ Тл).

Экспериментальное исследование МГД-течений теплоносителя в таких условиях осложняется возможностью использовать диагностическое оборудование, большинство типов которых передает данные в измерительный прибор в виде электрического сигнала.

В данной работе рассматривается широкий перечень приборов для измерения давления, способных работать в условиях постоянного поперечного однородного и импульсного (длительностью 100 мс) магнитного поля. Среди них были выделены датчики давления, сохраняющие характеристики в указанных условиях: датчик Kistler 601A, а также оптоволоконный тип датчика.

Построенные графики зависимости для датчика Kistler 601A (рис. 1) позволяют оценить стабильность работы и влияние магнитного поля на характеристики прибора.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 25-19-00642 «МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкость»

Литература

1. ITER EDA N. J. W. S. et al. MHD stability, operational limits and disruptions. — 1999.
2. Поддубный И.И. и др. Опасные режимы теплообмена при течении жидкого металла в вертикальных трубах и каналах в условиях термоядерного реактора // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2015. — Т. 38. — №. 3. — С. 5–15.

*К.Е. Шакин, студ.; Р.Ф. Рахимов, асп.;
рук. И.А. Беляев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ТРУБ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Концепция тепловой трубы (ТТ), в которой перенос тепла осуществляется за счёт испарения и конденсации рабочего тела, а циркуляция обеспечивается капиллярными силами [1], была предложена Гаулером еще в 1942 г. [2]. Однако термин «тепловая труба» (Heat pipe) был введен позже, в 1963 г., Гровером [3, 4], который подтвердил высокую эффективность и работоспособность устройства.

Интерес к ТТ обусловлен их ключевыми преимуществами: способностью передавать тепло с малыми градиентами температур (сверхпроводимость тепла) и работать автономно за счет капиллярных сил. Это обусловило их возможность применения в космической технике [5]. В наземных условиях гравитация может усиливать перенос теплоносителя, что расширяет сферу их использования, например, при строительстве на нестабильных грунтах [6].

В настоящей работе представлены результаты проведенных экспериментов с тепловой трубой и с вертикальной ориентацией. Была проведена серия экспериментов по нагреву испарительной части ТТ, в результате чего были получены зависимости изменения температур от смонтированных термопар вдоль транзитной зоны на внешней части трубы. Результаты проведенных экспериментальных работ позволили провести анализ временных интервалов выхода на режим рассматриваемого устройства, что является актуальным вопросом при изучении характеристик тепловых труб с высокими температурами кипения рабочего тела.

Литература

1. **Ивановский, М.Н.** Физические основы тепловых труб / М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, И.В. Глодкин. — Москва: Атомиздат, 1978.
2. **Gaugler R.S.** Heat transfer device. Publ. US Patent N 2350348, 1944.
3. **Grover G.M., Cotter T.P., Erickson G.F.** Structures of very high thermal conductance.— «J. Appl. Phys.», 1964, v. 35, p. 1990.
4. **Grover G.M.** Evaporation-condensation heat transfer device. US Patent N 3229759, 1966.
5. **В.Г. Воронин, А.В. Ревякин, В.Я. Сасин, В.С. Тарасов.** Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1976.
6. **Wagner, A.M.** Thermosyphon Heat Pipes for Stabilization of Railroad Track Substructure over Permafrost. In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting (No. 13-1636), 2013.

Д.К. Журба, студ.; рук. Н.Г. Разуванов, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЗМЕЕВИКЕ

Змеевики являются одними из наиболее распространенных частей трубопроводов в конструкции современных теплообменных аппаратов. Характеристики течений в них сильно отличаются от таковых в прямых трубах, при этом численное моделирование в них усложняется тем, что в них все поверхности криволинейные, вследствие этого в такой геометрии невозможно построение структурированных расчетных сеток. Изучение характеристик течения в них представляет практический интерес, поскольку картина течения в изогнутых трубах изменяется под действием инерционных центробежных сил.

Разработана методика численного моделирования гидродинамики и теплообмена в изогнутых трубах, в частности — в змеевиках, позволяющая моделировать течение в геометрии прямой трубы с использованием структурированной расчетной сетки. Для этого используется криволинейная система координат [1]. Проведён комплекс расчётных исследований течений жидкого металла в изогнутой трубе при условиях нагрева и охлаждения. В качестве модельной жидкости выбрана ртуть.

В результате получены поля безразмерной продольной компоненты скорости и безразмерной температуры течения, а также распределение скорости и температуры по длине канала. В случае нагрева и охлаждения обнаружено сильное влияние инерционных и гравитационных сил на характеристики течения, нарушающее осевую симметрию полей скорости и температур.

Литература

1. Разуванов Н.Г., Белафина Е.А., Полянская О.Н., Беляев И.А. Решение задачи конвективного теплообмена в кольцевой трубе в криволинейной системе координат // Теплоэнергетика — 2022 — № 8 — с. 39–49 задачи конвективного теплообмена в кольцевой трубе в криволинейной системе координат // Теплоэнергетика — 2022 — № 8 — с. 39–49.

И.А. Дрегер, студ.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ НА ТЕПЛООБМЕН В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ БЛАНКЕТА ТОКАМАКА

В нормальном режиме работы, магнитно-гидродинамические эффекты (МГД) в жидком металле (ЖМ) прямоугольного канала бридера токамака исследованы в достаточно широком диапазоне значений основных переменных, необходимых для полного описания системы. Однако, во время переходных процес-

сов в плазме, в металле возбуждаются вихревые токи, образующиеся в результате внешнего переменного поля магнитной индукции, и могут значительно повлиять на течение ЖМ и теплообмен. Экспериментальное исследование описанных МГД-эффектов трудно реализуемо, что позволяет оценить их действие только с помощью CFD-моделирования процесса. В [1] продемонстрировано влияние индуцируемого поля магнитной индукции на профиль скорости с достаточной точностью в сравнении с известными аналитическими зависимостями, что доказывает возможность составить CFD-модель blankets. Но для исследования теплообмена этого недостаточно, поэтому в программе ANES была создана модель с параметрами, схожими с работой С. Смоленцева [1], но также учитывающая источники тепла в канале. По данным этой модели можно дать оценку количеству выделяемого тепла и полю температуры. Имеется бесконечно длинный плоский канал, в котором реализовано течение ЖМ. Высота $2a$, толщина стенки t_w . Канал находится в поле магнитной индукции $B(B_z, B_x(t))$. На стенки действует тепловой поток плотностью q . В ЖМ также реализовано объемное тепловыделение, возникающие в результате вихревых токов.

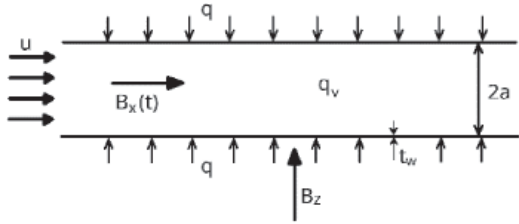


Рис. 1. Постановка задачи течения ЖМ и теплообмена в плоском канале

Литература

1. S. Smolentsev. A model and assessments of the effect of transient plasma on liquid metal flows in a fusion blanket // Fusion Engineering and Design, 2025.

*Д.А. Синяев, студ.;
рук. И.А. Беляев, к.т.н., доц.;
конс. асп. Е.М. Шенягин, (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕПАД ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию свободной конвекции в жидком металле (ЖМ) — ртути, при наложенном поперечном магнитном поле. Целью данной работы является анализ пространственного распределения разницы температур внутри объема ЖМ и термостатированной стенки по высоте рабочего участка (РУ).

Исследование проводилось на стенде РК-3. РУ представлял собой призматическую полость 56×56×650 мм, заполненной ртутью. В центре РУ был установлен вертикальный цилиндрический нагреватель диаметром 6 мм. Измерения выполнялись в четырех сечениях по высоте (110, 210, 310 и 510 мм от нижней стенки (дна) РУ), при варьировании тепловой мощности нагревателя 100, 250, 500 и 750 Вт, и значении магнитной индукции 0, 0,85, 1,7 Тл. Режимные параметры фиксировались с помощью восьмитермопарного зонда. Одним из важных параметров для анализа выступала разность температур между объемом ЖМ и термостатированной стенкой.

В результате построены зависимости разницы температур от высоты сечения РУ для всех исследованных режимов. Установлено, что разница температур возрастает по высоте РУ, что согласуется с развитием восходящего конвективного потока вдоль нагревателя. Воздействие магнитного поля приводит к существенному увеличению перепада температур в одном и том же сечении. Данный эффект объясняется подавлением конвективного механизма теплопередачи и переходом к режиму, близкому к теплопроводности.

Наблюдаемое увеличение перепада температур с увеличением значения индукции магнитного поля качественно подтверждает гипотезу о стабилизирующем влиянии магнитного поля на свободноконвективный поток, подавлении турбулентных пульсаций и, как следствие, снижении эффективности теплоотвода от нагревательной поверхности.

Литература

1. **Jarall S., Campo A.** Experimental study of natural convection from electrically heated vertical cylinders immersed in air // *Experimental Heat Transfer*. 2005. Vol. 18. No. 2.
2. **Popiel C.O.** Free convection heat transfer from vertical slender cylinders // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008. Vol. 32. No. 5.

*В.Д. Гайдаенко, асп.; Э. А.Х. Бсуль, асп.;
рук. В.Д. Локтионов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», АО «ЭНИЦ»)*

ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦАХ ОКСИДНОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА КОРИУМА ПРИ ЕГО СТРАТИФИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ ЯЭУ

Представлен анализ влияния температурных граничных условий на боковой и верхней поверхностях оксидного слоя расплава с объемным тепловыделением на характеристики теплообмена (значения чисел Нуссельта, тепловые потоки) на этих граничных поверхностях в условиях тяжелой аварии (ТА) в случае стратификации расплава кориума внутри корпуса ядерного реактора [1]. Многопараметрический анализ теплового состояния слоя и условий теплообмена на его поверхностях выполнялся при варьировании теплофизических свойств оксидного слоя, геометрии ванны расплава, объемного тепловыделения и температурных граничных условий. Получены осредненные и локальные значения характеристик теплообмена для серии численных экспериментов, выполненных с помощью CFD-моделирования расчетным кодом ANES. Результаты работы могут быть востребованными при анализе тяжелых аварий в ЯЭУ и в расчетных программах, предназначенных для выполнения подобного анализа.

Литература

1. Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996. In vessel Coolability and Retention of a Core Melt. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1.

В.В. Кузнецов, студент; рук. Д.О. Дуников, к.ф.-м.н., доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОГИДРИДА ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА



Рис. 1. Принцип работы водородного велосипеда (ЭЛ — электролизер, МГ — емкость с металлогидридом, ТЭ — топливный элемент, Н — нагреватель, ЭД — электродвигатель)

Хранение водорода является ключевой технологией, обеспечивающей развитие экономики на основе водорода и топливных элементов. Один из перспективных способов хранения водорода — использование гидридов интерметаллических соединений (металлогидридов).

Интерметаллиды — это химические соединения двух

и более металлов, которые способны обратимо поглощать значительные количества водорода в широком диапазоне условий с образованием гидридной фазы.

Металлогидридная технология хранения может быть использована для питания топливных элементов. Например, по такому принципу работает водородный велосипед (рис. 1): полученный с помощью электролиза водород запасается в металлогидридном хранилище и используется для питания электродвигателя с помощью водородо-воздушного топливного элемента.

Однако у металлогидридного патрона и самого интерметаллида существует ряд недостатков, которые снижают эффективность системы — это в первую очередь низкая теплопроводность засыпки и агломерация частиц. Оптимизация конструкции хранилища для улучшения теплообмена наряду с модификацией самого материала (добавление пенометаллической матрицы, углеродных наноматериалов или формирование композитов с органическим связующим) позволят значительно улучшить характеристики металлогидридного патрона: увеличить срок службы, дальность пробега, и сократить время зарядки.

Литература

1. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулялирования водорода // Российский Химический Журнал. — 2006. — Т. L, № 6.
2. Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов. Альтернативная энергетика и экология. 2005 г, № 12.

Е.С. Готовцева, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНОМАЛЬНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ УДАРЕ СТРУЙ ГАЗА О ПОВЕРХНОСТЬ

В данной работе исследовался удар газовых струй о поверхность жидкости. В процессе проведения цикла опытов на созданной на кафедре ИТФ МЭИ экспериментальной установке было выяснено, что вторичные течения, возникающие в приповерхностном слое, носят своеобразный характер. Течение жидкости в приповерхностном слое под струей, в том числе и в самой каверне, имеет топологию седловой точки. Этот эффект остается справедливым и для множества струй, одновременно ударяющихся о поверхность жидкости, рис. 1. Исследования проводились для разного числа струй (от 1 до 50) и показали высокую воспроизводимость полученной картины течения вплоть до начала интенсивного волнообразования, вызываемого неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца.

Это дает возможность реализовать в визуально наблюдаемом эксперименте предсказанные ранее лишь теоретически гетероклинические структуры [1].

Струйные течения газа и жидкости находят широкое применение в задачах технического охлаждения стальных поверхностей, используются в металлургическом производстве. Наблюдаемый эффект ранее не описывался, обычно предполагается, что удар струи индуцирует тороидальный вихрь в жидкости [2, 3].

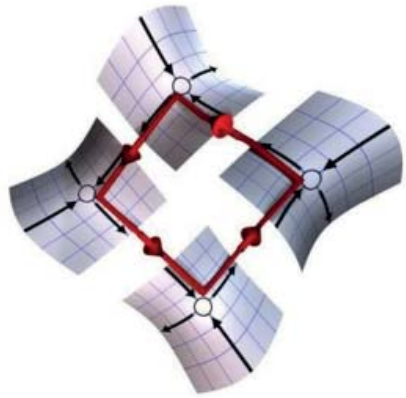


Рис. 1. Линии тока на поверхности жидкости, возникающие при одновременном ударе четырех струй

Литература

1. **Подвигина О.М.** Гетероклинические циклы в природных системах // Физика земли. № 1, 2020. 133–141.
2. **Ho Yong Hwang.** A study of impinging gas jets on liquid surfaces. Thesis.McMaster University. 2008.
3. **Miguel A. Barron,** Interaction between a liquid surface and an impinging gas jet // World J. of Engineering and Technology. 2021. 9. 793–803.

Е.А. Тимохин, студ.; рук. К.Б. Минко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ВНУТРИ ПЛОСКООВАЛЬНЫХ ТРУБОК

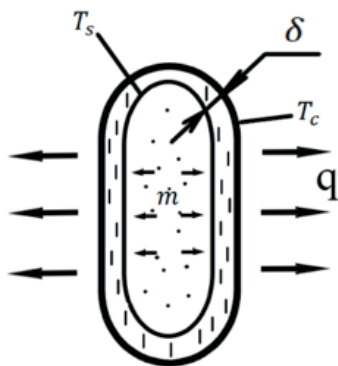


Рис. 1. Поперечное сечение

Одним из способов отвода тепла в энергетических установках, использующих цикл Ренкина на низкокипящих рабочих телах, является применение конденсаторов воздушного охлаждения. Важность точного определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации обусловлена тем, что в таких системах термические сопротивления со стороны конденсирующегося и охлаждающего потоков сопоставимы по величине. В последние годы в конденсаторах всё шире используются трубки с плоскоовальным сечением [1]. Для получения характеристик течения в расслоенном и расслоенно-волновом режимах может быть применён метод VOF, дополненный моделями тепло- и массообмена на межфазной границе.

В работе рассматривается трёхмерная нестационарная задача конденсации внутри плоскоовальной трубы (поперечное сечение показано на рис. 1) длиной L_t и диаметром скругления d . По внутренней полости плоскоовальной трубы движется нисходящий поток пара хладагента R245fa по каналу с эквивалентным диаметром 28 мм при массовых скоростях от 50 до 150 кг/(м²·с). Цель работы — изучение закономерностей теплообмена при конденсации внутри плоскоовальных трубок, определение зависимостей от геометрической конфигурации трубы и режимов течения, а также сравнение полученных результатов с известными корреляциями и экспериментальными данными.

Литература

1. **Wilson M.J.** Refrigerant charge, pressure drop, and condensation heat transfer in flattened tubes / M.J. Wilson, T.A. Newell, J.C. Chato, C.A. Infante Ferreira // *International Journal of Refrigeration*. — 2003. — Vol. 26, № 4. — P. 442–451. — DOI: 10.1016/S0140-7007(02)00157-3.

*Д.А. Чижиков, М.В. Лоцманов, студ.; Р.Ф. Рахимов, асп.;
рук. Е.А. Белавина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ИМИТАТОРА РАСПЛАВА СОЛИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В реакторных установках нового поколения рассматривается применение расплавов солей, таких как «флайб» (FLiBe) и «флинак» (FLiNaK). Стоит отметить слабое влияние магнитного поля для рассматриваемых теплоносителей. Экспериментальное исследование процессов с расплавами солей является трудозатратной задачей, вызванной высокими рабочими температурами жидкой фазы и требованиями к конструкционным материалам коррозионной стойкости. Поэтому в работе [1] авторы рассматривают модельный теплоноситель.

В настоящей работе проводилось численное моделирование смешанной конвекции ($Ri \approx 1$) при подъемном течении ($Re = 7000 - 10000$) имитатора расплава соли в прямоугольном канале (100x40 мм, длиной 1 м и толщиной стенки 2 мм) под воздействием поперечного магнитного поля ($Ha = 11$). Моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 5.6. В качестве имитатора расплава соли рассматривается 20% водный раствор гидроксида калия, теплофизические свойства и проводимость которого брались из [2] и [3], соответственно. Рассматривались две конфигурации течения: изотермическая задача и с односторонним обогревом (нагрев одной стенки выбран с целью увеличения градиента температур в сечениях).

В результате моделирования были построены поля скорости и температуры в сечениях, получены коэффициенты гидравлического сопротивления, распределение числа Нуссельта по длине.

Литература

1. **Белавина Е.А., Беляев И.А., Пятницкая Н.Ю.** Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева // ВАНТ Ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2021 82–97.
2. **Бобылев В.Н.** Физические свойства наиболее известных химических веществ: справочное пособие. М.: ПХТУ им. Менделеева издательский центр, 2003.
3. **Gilliam R.J. et al.** A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. T. 32. № 3. С. 359–364.

В.А. Мукуфа, студ.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД-ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ СРЫВА ПЛАЗМЫ

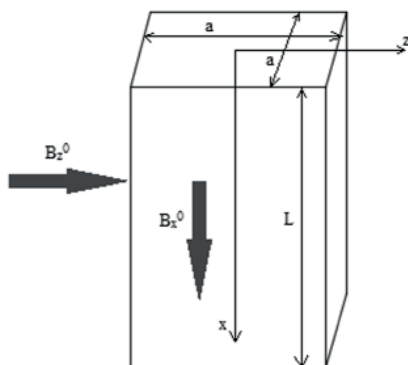


Рис. 1. Схема задачи

ного поля B_x^0 (скорость изменения $\gamma = -100$ Тл/с) при фиксированном тороидальном поле $B_z^0 = 4$ Тл (см. рис 1).

Цель работы — анализ влияния переменного магнитного поля на течение жидкого металла с учётом проводимости стенок канала.

Для решения задачи была разработана и верифицирована модель в коде ANES для трёх типов стенок: непроводящие, сверхпроводящие и с произвольной проводимостью.

В результате установлено существенное влияние переменного магнитного поля на характеристики течения. Оно формирует несимметричный профиль скорости с максимальным значением $\sim 0,3$ м/с для случая изолированных и сверхпроводящих стенок. Для стенок с произвольной проводимостью максимальная скорость потока уменьшается.

Литература

1. **Smolentsev S.** A model and assessments of the effect of transient plasma on liquid metal flows in a fusion blanket // Oak Ridge National Laboratory. — 2025 с.
2. **Брановер Г.Г., Цинобер А.Б.** Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. — М.: Наука, 1970. — 190 с.

Т.А. Гатауллин, аспирант; рук. К.Б. Минко, к.т.н., доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПЛЁНОЧНОМ КИПЕНИИ НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

Пленочное кипение насыщенной жидкости достаточно хорошо исследовано [1]. Для этого режима между стенкой и жидкостью формируется стабильная пленка пара, из-за чего интенсивность теплообмена достаточно низкая. Несмотря на это, ряд особенностей пленочного кипения, включая детальное понимание влияния локальных характеристик (таких как толщина паровой пленки) на интенсивность теплоотдачи, до сих пор остаются малоизученными.

Ранее пленочное кипение было смоделировано в работе [2], где результаты моделирования с использованием метода VOF показали хорошее согласие с экспериментальными данными [3] по интегральным характеристикам.

Целью настоящей работы было проведение моделирования пленочного кипения хладона R113 при температуре насыщения на горизонтальных цилиндрах, анализ динамики колебания межфазной поверхности вдоль периметра цилиндра и последующее сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными из [3].

Расчеты проводились в исследовательском CFD-коде ANES. Для описания двухфазной среды был использован метод VOF, а учет тепло- и массообмена через межфазную поверхность был выполнен с использованием модифицированной модели Lee.

Литература

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов // М.: Изд-во ИПМех РАН. — 2020.
2. Минко К.Б., Яньков Г.Г., Гатауллин Т.А., Артемов В.И., Железнов А.П. Модель для определения интенсивности тепло- и массообмена на межфазной границе при использовании метода VOF для расчета задач испарения и конденсации // Теплоэнергетика. 2025. № 3. С. 80–93.
3. Кузма-Кичта Ю.А. Исследование теплообмена и механизма кипения на металлической поверхности без покрытия и с малотеплопроводным покрытием: дис. ... канд. техн. наук. М.: Ин-т высоких температур АН СССР, 1974.

Э.АХ. Бсуль, асп.; В.Д. Гайдаенко, асп.;
рук. В.Д. Локтионов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», АО «ЭНИЦ»)

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦАХ
ПЛОСКОГО СЛОЯ РАСПЛАВА, ПОДОГРЕВАЕМОГО
ПО ЕГО НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, И ВЯЗКОСТИ
РАСПЛАВА НА ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА
НА ГРАНИЦАХ СЛОЯ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ
АВАРИИ В ЯЭУ**

Выполнен анализ влияния параметров вязкости расплава для плоского цилиндрического слоя, подогреваемого по нижней и охлаждаемого по его боковой и верхней поверхностям, на значения чисел Нуссельта для нижней и боковой поверхностей слоя, а также изучено влияние геометрических размеров слоя на параметры теплообмена на его границах. Подобный слой расплава соответствует верхнему (металлическому) слою в стратифицированной ванне расплава кориума, которая формируется при тяжелой аварии (ТА) внутри корпуса ЯЭУ, а течение расплава в слое происходит при высоких (свыше 10^7) числах Рэлея. Вязкость расплава рассматривалась как функция температуры и определялась с использованием модели Хираи [1], учитывающей температуру плавления, плотность и молярную массу входящих в этот расплав компонентов. Анализ результатов показал, что учет температурной зависимости вязкости расплава, приводит к отличию до 20% в значениях чисел Нуссельта и тепловых потоков на граничных поверхностях слоя от аналогичных значений, определенных при постоянном значении вязкости расплава. Данный факт необходимо принимать во внимание при оценке тепловых нагрузок, действующих на корпус ядерного реактора при ТА.

Литература

1. ISIJ International, Vol. 62 (2022), No. 11, Review on the Viscosity of Iron-based Melts in Metallurgical Process pp. 2172–2182., Shanchao GAO, Kexin JIAO, Jianliang ZHANG, Xiaoyue FAN, Zhengjian LIU and Anyang ZHENG.

*Н.М. Ривис;**рук. Д.А. Бирюков, к.т.н., зав. Лаб. №5 ОИВТ РАН, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ВОДНО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Загрязнение водных экосистем нефтепродуктами, в частности дизельным топливом, остается важной экологической проблемой. Для диагностирования растворенных нефтепродуктов предлагается использование гидролюминесценции. Гидролюминесценция возникает самопроизвольно в диэлектрических жидкостях при протекании их по диэлектрическим каналам за счет трибозффектов [1]. При спектральном исследовании появляющегося свечения на спектре возможно обнаружить элементы, растворенные в циркулирующей жидкости, механизм аналогичный механизму при триболюминесценции кристаллов сульфатов лантанидов [2].

В данной работе в качестве экспериментальной жидкости использовалась водно-топливная эмульсия. Проводимость среды оказалась недостаточной для самопроизвольной генерации излучения. Для инициирования свечения к опытному участку подводилось внешнее напряжение 10 кВ и 1 мА. Получаемое свечение было спектрально исследовано для различных концентраций дистиллированной воды и дизельного топлива (ГОСТ 32511-2013). На спектрах видно, что при достижении объёмной концентрации 1:12,5 на спектре возникает широкополосное излучение в ультрафиолетовом диапазоне.

Предполагается, что данное широкополосное излучение спровоцировано люминесценцией в ультрафиолете, вероятно полициклических ароматических углеводородов. Для подтверждения данной гипотезы дизельное топливо и водно-топливная эмульсия облучались УФ, однако широкополосное излучение наблюдается при гидролюминесценции не воспроизводится при экспериментах с УФ облучением.

Экспериментально была подтверждена гипотеза использования гидролюминесценции, как метода диагностики присутствия нефтепродуктов в водных растворах.

Литература

1. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N.** Spectroscopic diagnostics of hydrodynamic luminescence // Journal of Molecular Liquids. — 2018. — Т. 266. — С. 75–81.
2. **Тухбатуллин А.А., Панова Н.А., Шарипов Г.Л.** Люминесценция кристаллов сульфатов лантанидов (III) при фото-, рентгено- и трибовозбуждении // Оптика и спектроскопия. — 2025. — Т. 133. — №. 2. — С. 141–150.

Д.В. Ширяев, асп.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Актуальность работы обусловлена недостатком экспериментальных и численных данных о турбулентной конвекции и теплопереносе в жидких металлах с низким числом Прандтля и высоким числом Рейнольдса. Изучение процессов смешанной турбулентной конвекции в реакторных установках сопровождается сложностью установки новых датчиков и ограниченным количеством измерительных точек [1]. Получение дополнительных данных возможно с использованием численного моделирования. Однако для обеспечения достоверности результатов требуется подтверждение адекватности численных моделей реальным физическим процессам.

В представленной работе проводится численный анализ турбулентной смешанной конвекции свинцового теплоносителя в верхней камере реакторной установки с применением CFD-пакета Star-CCM+. Расчёты выполняются на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с использованием нескольких моделей турбулентности. В исследовании рассматриваются и сопоставляются модели $k-\varepsilon$ Realizable, Spalart–Allmaras, $k-\omega$ SST и $k-\omega$ Wilcox, что позволяет определить наиболее адекватный подход для описания процессов перемешивания и теплообмена в жидкометаллическом свинцовом теплоносителе.

Сравнение численных результатов с экспериментальными данными по температурным полям, отражающим структуру потоков холодного и горячего теплоносителей и особенности их смешения в выходном патрубке, служит основой для оценки точности различных турбулентных моделей. Полученные результаты станут основой для формирования алгоритма повышения достоверности RANS-моделирования, предполагающего уточнение замыкающих соотношений и адаптацию моделей турбулентности к условиям реакторных установок с жидкометаллическим свинцовым теплоносителем.

Литература

1. Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 4. С. 469–480.

*Е.В. Богданова, П.А. Тупотилов, студенты; Т.Н. Абсатаров, асп.;
рук. А.В. Захаренков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Развитие современной электроники и энергетики сделало типы охлаждения с использованием фазового перехода одним из приоритетных направлений в современной теплофизике. Интенсификация теплообмена с фазовым переходом (или теплообмена при кипении) может быть достигнута несколькими способами, некоторые из которых можно успешно совмещать для получения лучших результатов. Одним из самых эффективных методов можно назвать модификацию теплообменных поверхностей для получения на них различных развитых структур. Модификация поверхностей сочетается с охлаждением диспергированным потоком, методом, который обеспечивает высокую эффективность теплоотдачи среди существующих методов жидкостного охлаждения с фазовым переходом [1, 2].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена на технически гладкой поверхности мишени и мишени с шероховатостью, модифицированной электронным пучком (размер шероховатости 15 мкм) в условиях одностороннего нагрева тепловыми нагрузками порядка нескольких МВт/м² и ее охлаждении диспергированным потоком теплоносителя. Приведено краткое описание установки, гидравлического контура и рабочего участка с мишенью. Получены экспериментальные данные по температуре мишени, показано влияние расхода компонентов теплоносителя на изменение температуры мишени, выполнена оценка плотности теплового потока, воспринимаемого мишенью.

Контролируемое увеличение шероховатости охлаждаемой поверхности является эффективным способом интенсификации теплообмена диспергированным потоком, позволяя существенно повысить критический тепловой поток.

Литература

1. **Liang G., Mudawar I.** Review of spray cooling — Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 1174–1205.
2. **Liang G., Mudawar I.** Review of spray cooling — Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 1206–1222.

*Д.Н. Сибряева, студ.; Н.М. Ривис, асп.;
рук. Д.А. Бирюков, канд. техн. наук, зав. Лаб. № 5 ОИВТ РАН,
доцент каф. МЭИ*

ЗАВИСИМОСТЬ ЗАЗОРА МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОБОЯ В УСЛОВИЯХ КАВИТИРУЮЩЕЙ СТРУИ

Электрический пробой в жидкостях в условиях развитой кавитации представляет собой сложный физический процесс, остающийся недостаточно изученным [1], несмотря на его важность для различных областей. Особый интерес представляет пробой в динамических потоках, где кавитационные пузырьки могут выступать в качестве центров инициирования разряда и существенно влиять на его характеристики [2]. Эксперименты проводились на установке замкнутого цикла, рабочей жидкостью служила дистиллированная вода с проводимостью ~ 10 мкСм/см. Циркуляционный насос создавал поток, который через форсунку формировал осесимметричную струю, направленную в зазор между двумя коаксиально расположенными остроконечными вольфрамовыми электродами. Межэлектродное расстояние регулировалось шаговым двигателем. Для создания однородного электрического поля к электродам прикладывалось постоянное напряжение величиной 1.5 кВ. Кавитация в струе возникала естественным образом за счет геометрии форсунки и перепада давления. Момент пробоя фиксировался по визуальному свечению при помощи высокоскоростной видеокамеры VEO-E 310L с частотой съёмки 32 000 кадров в секунду. Критическое расстояние пробоя d_c определялось как максимальный зазор, при котором регистрировался хотя бы один акт пробоя.

Экспериментально установлено, что критическое межэлектродное расстояние для электрического пробоя в воде имеет прямую зависимость от скорости набегающей кавитирующей струи. Вероятно, причиной этого является инициирование и развитие разряда за счет увеличения концентрации кавитационных пузырьков, выступающих в роли центров зарождения, при повышении скорости потока.

Литература

1. **Александрович П.В.** диссертация на тему «Экспериментальные исследования электрического пробоя в газожидкостных средах» // Москва — 2017.
2. **Н.А. Булычев, М.А. Казарян, Л.Л. Чайков, П.И. Ивашкин, Р.А. Захарян, А.С. Аверюшкин, А.А. Чернов.** Влияние ультразвуковой кавитации на динамику и характеристики электрического разряда в жидкости // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2017.

*И.С. Белоусов, асп. (НИУ «МЭИ», АО «НИКИЭТ», Москва);
рук. В.В. Глазков, к.т.н. (НИУ «МЭИ»),
соавторы А.Г. Хижняк, С.В. Хомяков (АО «НИКИЭТ», Москва)*

ТЕПЛООБМЕН РАСПЛАВА СОЛИ В КАНАЛЕ ИМИТАТОРЕ ТРУБНОГО ПУЧКА

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию жидкосолевых реакторов ведутся с 60-х гг. прошлого столетия. Одной из особенностей таких реакторов является использование в качестве основной рабочей среды различных композиций расплавленных солей, содержащих компоненты отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В условиях ежегодного мирового накопления ОЯТ разработка жидкосолевых реакторов-утилизаторов представляет собой актуальную научно-техническую задачу [1].

Использование таких расплавов для накопления и передачи тепла обусловлено их высокой теплоемкостью, химической стабильностью при повышенных температурах, а также низким коэффициентом температурного расширения.

Особенности аккумулирования тепла в расплавах солей были экспериментально и численно исследованы в ряде работ: [2, 3]. Однако теплообмен при конвекции расплавов солей малоизучен, о чем свидетельствует небольшое количество научно-технических материалов по этой теме. В связи с этим на сегодняшний день актуален вопрос получения экспериментальных данных по теплообмену применяемых расплавов солей при их течении в каналах различной конфигурации.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению безразмерного коэффициента теплоотдачи в канале имитаторе поперечного обтекания трубного пучка при вынужденном подъёмном течении расплава соли. В качестве рабочей среды использовалась модельная соль $50\text{NaNO}_3 + 50\text{KNO}_3$ (мольные доли). В результате исследований были получены экспериментальные данные и сопоставлены с классическими эмпирическими зависимостями.

Литература

1. **Dolan T.J. (ed.)**. Molten salt reactors and thorium energy. Woodhead Publishing, 2017.
2. **Yang Z., Garimella S.V.** Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline // Solar energy. — 2010. — Т. 84. — №. 6. — С. 974–985.
3. **Flueckiger S., Yang Z., Garimella S.V.** An integrated thermal and mechanical investigation of molten-salt thermocline energy storage // Applied Energy. — 2011. — Т. 88. — №. 6. — С. 2098–2105.

*И.П. Семенов, студент;
рук. Н.В. Васильев, к.т.н., доцент (ОИВТ РАН, Москва)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ РАСПЛАВОВ ПРИ ПАРОВОМ ВЗРЫВЕ

Потенциально крайне опасное явление парового взрыва может наблюдаться при тяжелых авариях на атомных электростанциях, в металлургической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности. Использование различных двухкомпонентных имитаций кориума (применительно к моделированию аварий на АЭС) показало, что механизмы протекания и энергетика парового взрыва зависят от материала расплава. К тому же, в недавнем отчете о распределении затвердевших фрагментов кориума после аварии на АЭС «Фукусима-1» было показано, что они содержат большое количество дополнительных компонентов — металлов (в основном Zr и Fe).

Целью работы являлось определение влияния второго компонента с отличающимися физическими свойствами на механизм протекания процесса, для чего проводилось сравнительное экспериментальное исследование паровых взрывов с использованием капель расплавов олова (Sn) и смеси соль-олово (NaCl–Sn). Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [1, 2], в условиях самопроизвольного триггеринга процесса. Методика включала скоростную видеосъемку и исследование структуры затвердевших продуктов фрагментации расплава.

Процесс фрагментации капель расплава Sn, наблюдаемый в экспериментах, был наиболее близок к описанному в гипотезе ударных струй. Показано, что при взаимодействии с водой капель расплава NaCl–Sn паровые взрывы характеризуются большей мощностью с более тонкой фрагментацией олова, что, по всей видимости, объясняется большим запасенным удельным количеством теплоты на единицу массы соли NaCl по сравнению с оловом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-00269-25-00).

Литература

1. Клименко А.В., Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Скибин Д.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения стадии спонтанного триггеринга процесса // Доклады академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 13–16.
2. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Лиджиев Е.А. Экспериментальные исследования явлений, происходящих при триггеринге парового взрыва // Теплоэнергетика. 2024. № 7. С. 63–71.

*А.А. Назаретов, студ.; Н.Е. Балабаев, асп.;
рук. И.А. Беляев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В МАГНИТОМ ПОЛЕ

Жидкие металлы в качестве теплоносителя широко используются в атомной энергетике. Наиболее перспективным является направление связанное с термо-ядерной энергетикой, и прежде всего разработка термоядерного реактора типа «токамак» с магнитным удержанием плазмы [1]. В России экспериментальные исследования магнитногидравлических течений проводятся с 1960-х годов на комплексах, созданных совместно МЭИ и ОИВТ РАН.

Актуальность применения жидких металлов обусловлена их уникальными теплофизическими свойствами: высокой теплопроводностью, теплоемкостью, температурой кипения и низким давлением паров.

В настоящей работе представлены результаты проведенных экспериментов по течению жидкометаллического теплоносителя на стенде РК-3. Приведены расчеты коэффициентов гидравлического сопротивления при разных проводимостях стенки канала [2], разных числах Гартмана (Ha). Проведено сравнение результатов коэффициентов гидравлического сопротивления при разных параметрах.

Литература

1. **Тенин Л. Г., Свиридов В.Г.** Гидродинамик и теплообмен МГД-течений в каналах / Издательство МЭИ, 2001. — 200 с.
2. **Лучинкин Н.А., Балабаев Н.Е., Федосеев Л.А., Шенягин Е.М., Беляев И.А.** Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле // Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 21.

К.А. Лесечко, студ. (НИУ МЭИ); С.М. Юдин, асп.;
рук. Ю.П. Ивочкин, д.т.н. (ОИВТ РАН, Москва)

ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАПЕЛЬ РАСПЛАВА И СФЕРИЧЕСКИХ ТЕЛ С ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ

Одной из наиболее важных и в то же время недостаточно полно изученных стадий маломасштабного парового взрыва является этап его триггеринга — дробления металлической капли при её взаимодействии с водой. Исследования данной стадии проводятся во многих развитых странах, начиная с середины прошлого века. Однако, несмотря на длительную историю изучения, на сегодняшний день отсутствует общепринятая теория, описывающая инициацию и последующее взрывное разрушение массы расплава. Это косвенно подтверждается разнообразием конкурирующих между собой гипотез. Затруднения в решении данной проблемы связано рядом экспериментальных трудностей, возникающих при движении жидкого металла.

Минимизировать возможные сложности можно используя в качестве модельных тел вместо жидкометаллических капель твердые сферы и полусферы (рис. 1), а также применяя в опытах расположенные в воде неподвижные измерительные датчики.

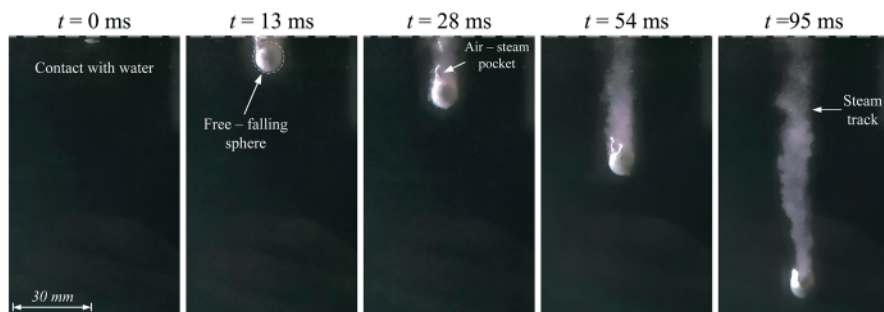


Рис. 1. Движение никелевой сферы $D = 10$ мм и начальной температурой $T_0 = 600$ °С в объеме воды при $T_w = 18$ °С

Настоящая работа направлена на изучение протекания данной стадии с целью установления характерных гидродинамических особенностей, приводящих к локальному соприкосновению холодной воды с горячей поверхностью и последующей взрывной фрагментации капли. В опытах использовались различные легкоплавкие металлы (Sn, Bi, Pb), а также сферы различных диаметров, поверхностные свойства которых изменялись путем нанесения на них тонкого слоя нагара.

Секция 45

ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Technologies and physics of low temperatures

Председатель секции: к.т.н. Сидоров Александр Андреевич

Секретарь секции: Асланян Лилит Оганесовна

И.А. Корняков, асп.; рук. Ю.Ю. Пузина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КИПЕНИЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ПРИ МАЛЫХ ГЛУБИНАХ ПОГРУЖЕНИЯ



Рис. 1. Кипение на свободной межфазной поверхности

В работе рассматриваются процессы тепломассопереноса сверхтекучего гелия при кипении в вертикальных каналах. Вниманию уделяется поведению межфазной поверхности в зависимости от различных параметров эксперимента: давления над зеркалом жидкости, удельной тепловой нагрузки и высоты столба жидкости над нагревательным элементом. Проведены эксперименты по кипению сверхтекучего гелия в вертикальном канале. С помощью раскадровок всех серий эксперимента классифицированы режимы кипения с разной морфологией межфазной поверхности. Проведена оценка расхождений между показаниями датчиков нагрузки и теплотой на испарение.

Рассмотрены особенности зарождения кипения на плоском нагревателе. Проведена обработка экспериментальных данных: предложена классификация режимов кипения в вертикальном канале в зависимости от визуального характера процессов на межфазной поверхности жидкость-пар. Построены зависимости положения уровня жидкости в канале от времени. Проведено сравнение всех серий, выявлены закономерности между скоростью межфазной поверхности, разностью температур в жидкости и глубиной погружения нагревательного элемента в сверхтекучий гелий.

Для режима кипения на свободной межфазной поверхности (рис. 1) отличительными чертами являются следующее: визуально определяется положение границы раздела фаз пар — жидкость, но при этом она не остается гладкой и имеет неупорядоченный вид и отсутствуют признаки наличия пара вблизи нагревателя, можно отметить относительно невысокую плотность потока массы на испарение при удельном тепловом потоке $(5,1 \div 18,3) \text{ кВт/м}^2$.

В режиме кипения с высокой интенсивностью затруднительно определить точное положение межфазной поверхности, кипение сопровождается образованием двухфазной неустойчивой смеси, которая занимает всю высоту. После включения нагрузки $(13,9 \div 31,3) \text{ кВт/м}^2$ межфазная поверхность сразу разрушается и кажущийся уровень гелия повышается.

Таким образом, при разработке и проектировании систем с использованием сверхтекучего гелия в качестве криоагента можно предполагать морфологию межфазной поверхности и соответствующий рабочий режим установки.

А.В. Рудов, асп.; рук. А.К. Ястребов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ПАРА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИСПАРЕНИИ С МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В данной работе предложен приближенный подход решения кинетического уравнения Больцмана (КУБ) с учетом объемной конденсации с целью определения минимального значения отношения температуры поверхности, при котором процесс объемной конденсации оказывает тепловое влияние на параметры пара. Используется метод расщепления по физическим процессам [1] с включенным в него процессом объемной конденсации. Функция распределения на каждом шаге по времени меняется в три этапа: свободномолекулярный разлет, пространственно-однородная релаксация, объемная конденсация. Первые два этапа описаны в [1], на третьем этапе изменение функции распределения молекул по скоростям происходит следующим образом:

- 1) Определяется функция распределения капель по размерам с помощью решения соответствующего кинетического уравнения [2].
- 2) По функции распределения капель вычисляются интегральные характеристики конденсационного аэрозоля: количество капель в единице массы или объема, массовая доля жидкости и т. д.
- 3) По изменению массовой доли жидкости определяются изменение числовой плотности и температуры пара.
- 4) Функция распределения молекул пара по скоростям изменяется в той же пропорции, в которой меняется функция распределения Максвелла при том же изменении числовой плотности и температуры.

Получены результаты расчетов для аргона, при этом для скорости нуклеации использовалась формула Френкеля — Зельдовича, для скорости роста капель — формула Герца — Кнудсена. Температура капель считалась равной температуре насыщения при давлении пара, это верхнее предельное значение для температуры капель, для рассматриваемого случая конденсации чистого пара температура капель близка к этой величине. Минимальное отношение температур «горячей» и «холодной» поверхностей при которой процесс объемной конденсации оказывает воздействие на температуру пара, для аргона составило 1,4.

Литература

1. **Аристов В.В. Черемисин Ф.Г.** Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: Вычислительный центр РАН, 1992.
2. **Стернин Л.Е.** Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение. 1974.

*Л.О. Асланян, аспирант;
рук. А.А. Сидоров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ CO₂ КРИОГЕННОЙ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сфера применения продуктов разделения воздуха охватывает множество отраслей: металлургию, медицину, ракетно-космическую промышленность. Наиболее распространённым способом получения компонентов воздуха являются криогенные воздуходелительные установки (ВРУ). До получения готового продукта, сырьё проходит несколько блоков, в которых осуществляется сжатие, предварительное охлаждение (в соответствующей системе СПО), осушка-очистка (в блоке комплексной очистки БКО) и разделение. Концентрации компонентов воздуха на входе в ВРУ могут варьироваться в зависимости от места забора и метеорологических условий. Например, концентрация диоксида углерода (CO₂) в составе воздуха может достигать до ~1000 ppm [1]. Однако, после очистки, содержание CO₂ в газе на разделение не должно превышать 1 ppm [2].

В настоящей работе рассматривается классический БКО, основанный на процессе адсорбции с регенерацией высокотемпературным потоком при пониженном давлении (TPSA), при этом, в качестве одного из вариантов эксплуатации БКО в расчетах исключается СПО, вследствие чего в адсорберы поступает воздух с повышенной температурой.

Основная цель настоящей работы заключается в определении степени влияния повышенной температуры воздуха на входе в БКО на процесс адсорбции CO₂. Моделирование процесса осуществляется с применением расчетного пакета, реализующего методы конечных объемов CFD (Computational fluid dynamics) с интегрированным в него специальным расчетным модулем «Адсорбция». Проверка методики осуществляется путем сравнения расчётных и экспериментальных данных с действующих объектов ВРУ.

Литература

1. **Взрывобезопасность воздуходелительных установок.** В.П. Беляков, В.Ф. Густов, В.И. Файнштейн и др.; Под ред. В.П. Белякова, В.И. Файнштейна. — М.: Химия, 1986, с. 224.
2. **Разделение воздуха методом глубокого охлаждения.** Технология и оборудование. В двух томах. Под редакцией д-ров техн. наук, проф-ров Епифановой В.И. и Аксельрода Л. С. Т. 2 Промышленные установки, машинное и вспомогательное оборудование. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М., «Машиностроение», 1973, с. 568.

Е.Д. Лаптева, асп.; рук. А.В. Бухаров, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВВОД КРИОГЕННЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ МИШЕНЕЙ В РЕАКТОРНУЮ КАМЕРУ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Одним из наиболее перспективных источников получения энергии является управляемый термоядерный синтез. В отличие от существующих источников, данный метод обладает наибольшим выходом энергии, не загрязняет окружающую среду, не нуждается в невозобновляемых ресурсах, не зависит от погодных условий.

Системы на основе управляемого термоядерного синтеза разделяются на магнитный способ удержания плазмы и инерционный способ. Следует отметить, что общим для обоих направлений является необходимость постоянного впрыска дейтериевого топлива в установки. Криогенные монодисперсные мишени, основанные на методе вынужденного капиллярного распада, являются наиболее перспективным методом впрыска топлива.

В данной работе приводится способ доставки мишеней в виде монодисперсного потока в реакторную камеру, также разрабатывается математическая модель и методология расчета параметров и характеристик криогенной мишени при ее попадании в плазму термоядерной камеры в программном обеспечении AnsysFluent для выявления оптимальных характеристик мишеней.

Литература

1. **Бухаров А.В., Королёв В.Д.** Использование дейтериевых конденсированных и криогенных монодисперсных мишеней в качестве нагрузок для исследования мегаамперных Z-пинчей.
2. **Кострюков А.Ю.** Взаимодействие водородных макрочастиц с плазмой токамаков., С-Петербург: дис. к. физ.-мат.н.

К.Д. Клочков, студ.;

рук. П.В. Козлов, к.ф.-м.н. (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССАХ

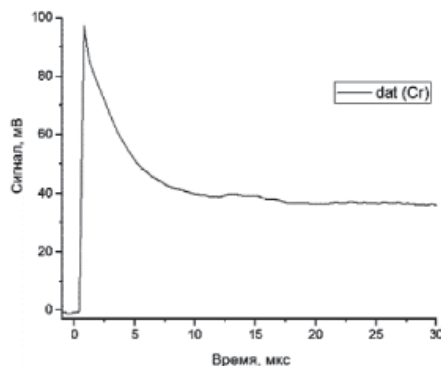


Рис. 1. График сигнала с термоэлектрического детектора в зависимости от времени

толщиной 0,3 мкм, которая генерирует сигнал термо-ЭДС в ответ на мгновенное тепловое воздействие [2].

Для верификации динамических характеристик термоэлектрического детектора была проведена серия экспериментов на ударной трубе НИИ механики МГУ. Несмотря на то, что данный метод относится к области высокотемпературных измерений, основной задачей являлась оценка именно быстродействия датчика. Полученные экспериментальные данные, представленные на рис. 1, подтвердили высокое быстродействие детектора.

Особый практический интерес представляет задача измерения тепловых потоков в быстродействующих процессах, протекающих в различных условиях. Однако использование традиционных методов — классических термопар, калориметров — оказывается малоэффективным [1].

В качестве перспективного решения для измерения быстроменяющихся тепловых потоков предлагается использовать специализированный термоэлектрический детектор. Его ключевой особенностью является уникальная наклонная столбчатая структура из хрома

Литература

1. Альмяшев В.И. и др. Комплексный термический анализ. СПб.: Изд-во «Лема», 2017.
2. Kotov M. The analysis of applicability of thermoelectric radiation detectors for heat flux measurements behind a reflected shock wave // Journal of Physics: Conference Series, 2021, doi:10.1088/1742-6596/2103/1/012218.

В.Д. Тарасенко, студ.;
рук. Ю.Ю. Пузина, к.т.н., зав.каф.
(ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КИПЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В ПРЯМОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Исследование свойств сверхтекучего гелия является актуальным научным направлением. Наиболее известное современное применение жидкого гелия в научно-исследовательской сфере — ускорительный комплекс NICA (сверхпроводящий коллайдер протонов и тяжёлых ионов) который использует жидкий гелий в качестве криоагента для захлаживания обмоток сверхпроводящих катушек.

Проведен эксперимент на установке [1] в прямом вертикальном канале. Экспериментальная ячейка состоит из цилиндрического канала диаметром 14 мм, наверху которого находится пробка, в которую встроен нагреватель из нихромовой нити диаметром 80 мкм. Нижний конец канала открыт. Ячейка погружена в объём сверхтекучего гелия на определенную глубину и полностью заполнена жидкостью.

При давлении выше 700 Па и нагрузке менее 6 В кипения не наблюдалось, однако при давлении ниже 700 Па возникают сильные колебания межфазной поверхности пар — сверхтекучий гелий. При нагрузке 6 В и выше наблюдались колебания с самой большой амплитудой от нагревателя до конца канала. При понижении нагрузки наблюдалось уменьшение амплитуды колебаний.

По результатам эксперимента получены экспериментальные зависимости амплитуды от нагрузки, давления от времени.

Литература

1. **Крюков А.П., Королёв П.В., Пузина Ю.Ю.** Экспериментальное исследование кипения He-II внутри пористого тела // Прикл. механика и технич. физика. 2017. № 4.

Е.А. Евко, аспирант; рук. Ю.Ю. Пузина, к.т.н.; доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАГРУЗКА ПРИ КИПЕНИИ НЕ-II В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКИ ДИАМЕТРОМ 70 МКМ

В связи с возрастающим вниманием ученых и инженеров различных отраслей промышленности и энергетики к свойствам сверхтекучего гелия проводится большое количество экспериментов, в частности кафедра Низких температур рассматривает кипение сверхтекучего гелия в тесненных условиях. В прошлой работе [1] рассмотрено воздействие монодисперсной засыпки диаметром 70 ± 5 мкм на движение межфазной границы Не-II-пар при кипении. В статье [2] продолжены экспериментальные исследования и показано влияние пористой засыпки на амплитуду и частоту колебаний межфазной границы. Рассмотрены зависимости этих величин от давления в криостате (температуры жидкости).

В данном докладе проанализирована восстановительная нагрузка при кипении сверхтекучего гелия — тепловой поток, при котором жидкость после режима пленочного кипения возвращается к непосредственному контакту с нагревателем. Для этого проведены 14 экспериментальных серий с уменьшением нагрузки от $13,5 \text{ кВт/м}^2$ до $6,6 \text{ кВт/м}^2$ в U-образном канале с использованием пористой засыпки из монодисперсных металлических шариков диаметром 70 ± 5 мкм. После обработки видеок кадров заметно, что колебания межфазной поверхности уменьшаются при снижении нагрузки, затем формируется гладкая тонкая пленка, а затем она и вовсе пропадает. Тепловая нагрузка, соответствующая исчезновению пленки, и есть восстановительный поток. Эта величина, таким образом, определяется на основании визуального анализа цветового изображения нагревателя, жидкости и паровых образований. Данные результаты позволяют изменять характер кипения сверхтекучего гелия: поддерживать стабильный теплоотвод; предотвращать перегрев критических элементов.

Литература

1. **Евко Е.А., Пузина Ю.Ю.** Тепломассоперенос при кипении сверхтекучего гелия в U-образном канале с использованием монодисперсной засыпки диаметром 70 мкм. // Тезисы докладов тридцать первой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: М.: ООО Центр полиграфических услуг «Радуга» 2025 г. С. 913.
2. **Евко Е.А., Пузина Ю.Ю.** Колебания межфазной поверхности при кипении сверхтекучего гелия в U-образном канале с использованием монодисперсной засыпки диаметром 70 мкм. // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: сборник материалов XXV Школы-семинара молодых уч-х и специалистов академика А.И. Леонтьева (9–13 июня 2025 года, г. Рыбинск). — Рыбинск: Издательство РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2025. С. 112–113.

В.С. Терешкин, асп.; рук. В.Ю. Левашов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ НА ОБЪЕМНУЮ КОНДЕНСАЦИЮ ПАРА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ ЛАВАЛЯ

Процессы объемной конденсации являются основой при ожижении и низкотемпературной сепарации компонент смеси, создании аэрозолей, ведут к значительной интенсификации теплообмена, их необходимо учитывать при расчете характеристик и струй реактивных двигателей [1, 2]. Влияние начального распределения малых кластеров на интенсивность протекания гомогенной нуклеации остается неясным и требует детального исследования.

В настоящей работе предложен гибридный подход, основанный на последовательном использовании методов молекулярной динамики в области малых степеней пересыщения и классической теории нуклеации в остальной области. Данный подход позволяет расширить диапазон применения теории объемной конденсации.

Представлены результаты моделирования стационарного течения пара в расширяющейся части сопла Лаваля. При моделировании учитывалась возможность присутствия малых кластеров на входе в сверхзвуковую часть сопла. Характеристики кластерного потока в этом случае определялись с применением методов молекулярно-динамического моделирования. Результаты расчета показали, что присутствие начального распределения малых капель конденсированной фазы может оказывать влияние на параметры потока. Присутствие кластеров существенно снижает степень пересыщения пара и, как следствие, приводит к изменению механизма образования конденсированной фазы с процесса объемной конденсации на конденсацию на поверхности кластеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-79-00063).

Литература

1. V. Alfeyorov, L. Bagirov, L. Dmitriev, V. Feygin, S. Imayev, J.R. Lacey, Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components, Oil Gas J. 103 (2005) 53–58.
2. M. Haghighi, K.A. Hawboldt, M. Abedinzadegan Abdi, Supersonic gas separators: Review of latest developments, J. Nat. Gas Sci. Eng. 27 (2015) 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.049>.

М.В. Мурашкин, асп.; рук. А.В. Бухаров, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОНОДИСПЕРСНЫЕ КРИОГЕННЫЕ МИШЕНИ ИСТОЧНИК EUV ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛИТОГРАФИИ

Одной из важнейших проблем современной электроники является проблема повышения плотности насыщения микросхем полупроводниковыми элементами. Самым простым способом продвинуться в направлении повышения уровня интеграции микросхем является использование для засветки фотошаблона жёсткого ультрафиолета — EUV (Extreme ultraviolet) с длиной волны $\lambda \approx 8\text{--}13$ нм. Это означает, что при тех же размерах микросхемы можно в 20 раз увеличить плотность её насыщения полупроводниковыми элементами. Источником EUV излучения может служить плазма, получаемая в результате взаимодействия мощного лазера (0,1–1 ТВт, 1000 нм, 100 Гц) с различными веществами в газообразной, жидкой или твёрдой фазе.

Согласно имеющимся в настоящее время результатам исследований, источники света на основе монодисперсных потоков жидких капель или твердых гранул ксенона или криптона позволяют получать EUV излучение высокой интенсивности с длинами волн — 10,82 нм для криптона и 11,24 нм для ксенона.

Разработана модель истечения криогенных струй в область низкого давления и на ее основе в программной среде PHOENICS проведены численные расчёты. Из результатов расчётов следует, что при инъекции тонких криогенных струй ксенона или криптона в среду с низким давлением струи сразу не замерзают и из них могут быть получены монодисперсные потоки жидких капель или твердых гранул ксенона или криптона.

Таким образом, на основании полученных результатов можно утверждать, что монодисперсные мишени из ксенона или криптона являются жизнеспособной альтернативой существующим в настоящее время EUV лазерно-плазменным источникам на основе цельнометаллических мишеней.

Литература

1. **А.В. Бухаров, А.С. Дмитриев.** Криогенные корпускулярные мишени в энергетике. М.: Издательство МЭИ, 2013. — 144 с.; ил.
2. **А. Bukharov, M. Buescher, A. Gerasimov, V. Chernetsky.** Dynamics of Cryogenic Jets: Non Rayleigh Breakup and Onset of Non-Axisymmetri Motions. Phys. Rev. Lett. 100:174505, 2008.

А.А. Добрецов, асп.; рук. А.А.Сидоров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСНОВЫ РАСЧЕТА КРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ МАШИН С ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТРУБОЙ

По результатам обзора научно-технической литературы были выявлены основные закономерности термодинамического расчета криогенных газовых машин с пульсационной трубой.

В современной практике используется последовательный трехэтапный расчет, состоящий из аналитического расчета, одномерного численного моделирования и многомерного численного моделирования [1–4].

В рамках аналитического расчета определяется сдвиг фаз между давлением и расходом газа на основе данных о габаритах и гидравлической проводимости ключевых элементов, их рабочих температурах, а также амплитуде и частоте колебаний давления газа в системе [1].

Одномерное численное моделирование учитывает динамическое изменение температуры, давления и расхода газа внутри элементов системы, а также параметры теплообмена в регенераторе при различных режимах работы, позволяя провести параметрическую оптимизацию ключевых элементов системы [1–2].

Многомерное моделирование применяется на заключительных этапах проектирования для выявления вторичных течений, оценки локальных необратимостей и оптимизацию критических узлов [4].

Данный алгоритм расчета снижает трудозатраты при разработке криорефрижераторов с пульсационной трубой и позволяет минимизировать число ресурсоемких испытаний на опытных образцах.

Литература

1. **Almtireen, Natheer & Brandner, Juergen & Korvink, Jan.** Pulse Tube Cryocooler: Phasor Analysis and One-Dimensional Numerical Simulation: Journal of Low Temperature Physics. 2020.
2. **C. Wang.** Numerical analysis of 4 K pulse tube coolers Part I. Numerical simulation. Cryogenics, 37(4), 1997, 207–213.
3. **Ke Tang, Ye Feng, Tao Jin, Shenghan Jin, Rui Yang.** Impact of Gedeon streaming on the efficiency of a double-inlet pulse tube refrigerator. Applied Thermal Engineering, Vol. 111, 2017, 445–454.
4. **Y.P. Banjare, R.K. Sahoo, S.K. Sarangi.** CFD simulation of a Gifford–McMahon type pulse tube refrigerator. International Journal of Thermal Sciences, Volume 48, Issue 12, 2009, 2280–2287.

Г.А. Беляев, студ.;

рук. Т.А. Алексеев, к.т.н., доц. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва)

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ БЫТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Энергоэффективность бытовых холодильников остаётся одной из приоритетных задач в условиях роста потребления электроэнергии и ужесточения стандартов по выбросам CO₂ [1].

В качестве объекта расчетов был взят холодильник двухкамерный LG GC-B509QK9M при традиционной пенополиуретановой изоляции. Далее была проведена оценка эффективности применения вакуумно-изоляционных панелей того же объёма.

Расчёт стационарных теплопотерь через ограждающие поверхности будет по сделан по формуле Фурье. Значительная доля потерь приходится на теплопередачу через ограждающие поверхности и кратковременные тепловые притоки при открывании дверей. Использование высокоэффективных изоляционных материалов (вакуумно-изоляционные панели, VIP) позволяет существенно снизить эти потери и, как следствие, годовое энергопотребление.

По итогам расчетов получившиеся теоретические теплопритоки будут сравнены с приведенными в паспорте технического устройства. Также будет понятно, насколько рационально применять вакуумно-изоляционные панели в разработке бытовых холодильников.

Литература

1. **Навасардян Е.С.** Криогенная техника // Большая российская энциклопедия : электронный ресурс.

Р.А. Завалин, студ.; рук. П.В. Королев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ КИПЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В работе представлены результаты исследования пленочного кипения сверхтекучего гелия (He-II) на цилиндрическом нагревателе, коаксиально расположенном внутри пористой оболочки. Актуальность работы связана с задачами создания эффективных систем криогенного охлаждения, в том числе для использования в условиях микрогравитации.

Целью исследования являлась математическое моделирование кипения сверхтекучего гелия и сопоставление результатов с экспериментальными данными. В основе теоретической модели лежит двухжидкостная модель Ландау, учитывающая специфику тепло- и массопереноса в сверхтекучей среде. Математическая модель, описывающая динамику межфазной границы, основана на аналоге уравнения Рэлея для цилиндрической геометрии. Модель учитывает теплоперенос, описываемый соотношением Гортера-Меллинка, фильтрацию гелия-II через пористую структуру по закону Дарси.

Для стационарного режима задача была сведена к решению квадратного уравнения полученного преобразованием системы уравнений для нестационарного процесса, что позволило аналитически определить толщину пленки δ . Для анализа нестационарного процесса система дифференциальных уравнений решалась численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Экспериментальные исследования [1] проводились на криогенном стенде, включающем специализированную ячейку с цилиндрическим нагревателем, помещенным в пористую оболочку из металлических сеток. Для измерения толщины паровой пленки использовалась система оптической визуализации, а температуры и давления регистрировались с помощью высокоточных терморезисторов и емкостного датчика давления.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных для пяти режимов при температуре He-II 2.04–2.10 К и постоянной тепловой нагрузке 24.5 кВт/м². Результаты показали хорошее согласие модели с экспериментом и близкие значения толщин пленки, полученные для стационарного и нестационарного подходов.

Литература

1. **Крюков А.П., Королев П.В., Пузина Ю.Ю.** Экспериментальное исследование кипения He-II внутри пористого тела // Прикладная механика и техническая физика, 2017, № 4. С. 126–134.

С.Б. Боковенко, асп.;
рук. А.А. Сидоров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ИСПЫТАНИЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ТУРБОКОМПРЕССОРА В РЕЖИМЕ ТУРБОДЕТАНДЕРА

В состав системы кондиционирования воздуха (далее СКВ) для авиационной техники как правило входит специальная холодильная турбомашинa. Однако ввиду санкционного давления поставки таких устройств в РФ прекращены. Ввиду этого в качестве замены предложены автомобильные турбонагнетатели, которые массово производятся на территории РФ.

В качестве модели для испытаний был выбран серийный турбонагнетатель ТКР 60.01.01-02 отечественного производителя АО «Турбокомплект» с диаметром рабочего колеса 60 мм. В результате испытаний на рабочем колесе был получен температурный перепад $\Delta T = 60\text{K}$, при $T_{\text{вх}} = 279\text{K}$ и $T_{\text{вых}} = 219\text{K}$. Массовый расход воздуха через рабочее колесо при этом был 0.33 кг/с , а степень расширения воздуха $\pi_t = 4$.

Численное моделирование данного процесса производилось с применением программы FD-turbo. Результаты численного моделирования и натурного эксперимента показали качественное и количественное согласование результатов, что подтверждает возможность дальнейшего исследования различных режимов работы турбонагнетателя с применением численных методов.

В ходе работы показано, что автомобильные турбокомпрессоры способны работать в режиме турбодетандера и могут быть использованы для разработки опытного образца СКВ с последующим испытанием по нормам испытаний авиационной техники для подтверждения тепловых характеристик и стойкости к внешним воздействующим факторам.

Литература

1. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023680809 Российская Федерация. Программа для определения характеристики ступени радиального турбодетандера на нерасчетных режимах / заявители и правообладатели А.А. Сидоров, А.К. Ястребов / ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» — № 2023669841; заявл. 28.09.2023; опубл. 05.10.2023– 1 с.

Я.А. Скуратов, студ.;
рук. Д.А. Коновалов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

С ростом плотности тепловыделения в современных ЦОД растет потребность в эффективном отводе тепловой нагрузки для обеспечения надежности, производительности и энергоэффективности. Традиционные системы воздушного охлаждения приблизились к пределу своих физических возможностей при больших тепловых потоках (до 1000 Вт/см^2).

Выявлено, что наиболее перспективным решением проблемы является переход к системам жидкостного охлаждения, которые обладают на порядок более высоким коэффициентом теплопередачи по сравнению с воздушными. Среди таких систем особой эффективностью отличаются системы с вынужденной конвекцией низкотемпературных теплоносителей или наножидкостей в микроканалах [1]. Интенсификация теплообмена в таких системах достигается за счет увеличения площади поверхности теплоотвода путем применения развитого оребрения или пористых структур (рис. 1).

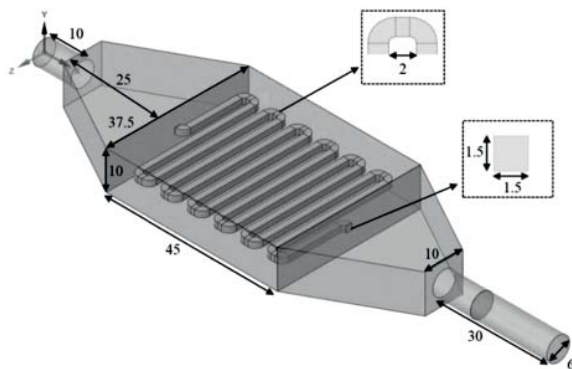


Рис. 1. Геометрия и размеры канального радиатора с пористыми ребрами

Выполнено моделирование теплообмена для ребер различной конфигурации, получены зависимости распределения температур и определены коэффициенты эффективности.

Литература

1. Li, L.; Leong, J.C. Effects of Porous Filling and Nanofluids on Heat Transfer in Intel i9 CPU Minichannel Heat Sinks. Electronics 2025, 14, 1922. <https://doi.org/10.3390/electronics14101922>.

П.А. Бубнов, аспирант; рук. А.К. Ястребов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПОТОКЕ ПАРА

Главной задачей данного исследования является сравнение подходов расчета процесса объемной конденсации при одномерном стационарном течении пара в сверхзвуковой части сопла. В данной работе в качестве конденсирующегося вещества был рассмотрен водяной пар.

Методика численного расчета базировалась на подходах, изложенных в [1]. В качестве математического описания использовались уравнения газодинамики, уравнение состояния идеального газа для паровой фазы, а также кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам. В отличие от [1], рассматривался поток чистого пара, а не парогазовая смесь, наличие сторонних центров конденсации не учитывалось. Расчеты гомогенной объемной конденсации производились для двух разных случаев. В первом считается, что температура капель равна температуре насыщения. Во втором случае используется более точная модель, где для капель используется отдельное уравнение энергии. Для расчета скорости роста использовалась формула Герца — Кнудсена, учитывающая, что температура капель и температура пара могут отличаться. В результате решения уравнений газодинамики и уравнения состояния определяются значения температуры пара и капель, числовая плотность капель, степень пересыщения и массовая доля жидкости/

Расчеты выполнялись с использованием оригинальной программы на языке Fortran в пакете Code:Blocks (свободно распространяемое программное обеспечение).

В результате моделирования процесса объемной конденсации потока пара разными методами получены данные для двух случаев, описанных выше, которые показывают, что существует заметное различие между данными моделями, выражающееся в отличии протекания процесса в обоих случаях. Количественные данные будут представлены на конференции.

Литература

1. **Корценштейн, Н.М., Ястребов А.К.** Межфазный теплообмен в процессе объемной конденсации при течении парогазовой смеси в сопле. Тепло-массообмен и гидродинамика в закрученных потоках: материалы IV Междунар. конф. (Москва, 18–20 окт. 2011). — Москва : МЭИ, 2011.

Д.А. Передерий, асп.; рук. А.А. Сидоров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОГО ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ РАНКА-ХИЛША С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD-ПАКЕТА

Одной из ключевых проблем любого металлургического комбината является утилизация доменного газа и повышение энергоэффективности всего производства чугуна и стали. В настоящее время существуют классические процессы по утилизации доменного газа, но они не дают значительного экономического и экологического эффекта для комбината. Для улучшения процесса утилизации доменного газа предлагается использовать вихревую трубу Ранка-Хилша.

В данной работе проведены серии численных экспериментов в специализированном CFD-пакете для решения задачи сепарации доменного газа на составные компоненты в вихревой трубе для последующих технологических операций. Особое внимание было уделено исследованию влияния различных моделей турбулентности на точность получаемых значений термодинамических параметров и эффективность разделения газовой смеси.

В результате численного моделирования получены распределения скоростей, давления, температуры и концентраций компонентов. Показана возможность охлаждения доменного газа, что позволяет сделать вывод, что при определённых параметрах возможно получить конденсацию целевого компонента- CO_2 .

Литература

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ». Москва 1969 г.

Секция 46

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Nanotechnologies

Председатель секции: к.т.н. Макаров Петр Георгиевич

Секретарь секции: Терешкин Вадим Сергеевич

Д.С. Толкунов, студ.; рук. В.Ю. Левашов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕШЁТЧНЫЙ МЕТОД БОЛЬЦМАНА

Вопрос рассмотрения задач энергомассопереноса никогда не потеряет своей актуальности, так как процесс является основополагающим для энергетической, химической и смежных отраслей. Конкретным примером изучаемого процесса выбрана переконденсация, представляющая собой сублимацию одной конденсированной фазы и конденсацию пара на другой [1], и имеющая особое значение в контексте холодильных установок, а также проектирования компактных устройств.

Для описания задачи переконденсации используется метод решётчных уравнений Больцмана (LBM), который в отличие от традиционных подходов, решающих макроскопические уравнения Навье-Стокса, моделирует динамику жидкостей на мезоскопическом уровне, описывая изменение распределения частиц по дискретным направлениям в узлах регулярной решетки. В LBM вводится дискретная скоростная сетка, при этом набор скоростей в каждой точке выбирается так, чтобы за шаг по времени частицы могли попасть в соседние узлы пространственной решетки. Для обозначения используемой скоростной модели и размерности задачи используют следующее обозначение — $D_n Q_m$, где n — указывает размерность задачи, а m — скоростную модель.

В процессе моделирования поставленной задачи переконденсации с помощью метода решётчных уравнений Больцмана (LBM) на сетке с одномерной постановкой и набором из трёх дискретных скоростей в каждой точке пространства ($D_1 Q_3$) были определены макропараметры системы, проведён анализ полученных результатов и оценка прикладного применения рассматриваемого метода.

Литература

1. **Крюков А.П.** Элементы Физической кинетики // Издательство МЭИ, 1995.

К.Т. Чан, асп.; рук. И.А. Михайлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗОНЫ СОЛНЕЧНОГО ИСПАРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГРАФЕН-ГИДРОГЕЛЕВЫХ МЕМБРАН

Солнечная дистилляция — перспективная экологически чистая технология, эффективно использующая возобновляемую энергию для получения пресной воды, особенно в засушливых регионах. В настоящее время активно исследуются наноструктурированные материалы, способные существенно повысить фототермическую эффективность солнечного испарения. Ранее предложен метод модификации нетканого материала графеновыми хлопьями, обеспечивший интенсивность испарения до $1,9 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ [1]. Однако слабая фиксация частиц вызывала их вымывание, а кристаллизация солей снижала эффективность. Для устранения этих ограничений разработана новая архитектура — прочная фиксация графеновых хлопьев в гидрогелевой матрице на основе поливинилового спирта и полиэтиленгликоля. Мембраны толщиной $\sim 300 \text{ мкм}$ обеспечивают стабильное испарение с интенсивностью до $2,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при работе с солевыми растворами. Проведена оптимизация конфигурации зоны испарения: максимальная скорость достигается при расстоянии между мембранами $L = 12,5 \text{ мм}$ и угле наклона $\alpha = 45^\circ$. При уменьшении L оптимальный угол возрастает. При $L = 8,3 \text{ мм}$, $\alpha = 60^\circ$, дальнейшее изменение α не повышает производительность из-за перекрытия мембран, что ограничивает испарение с нижней поверхности.

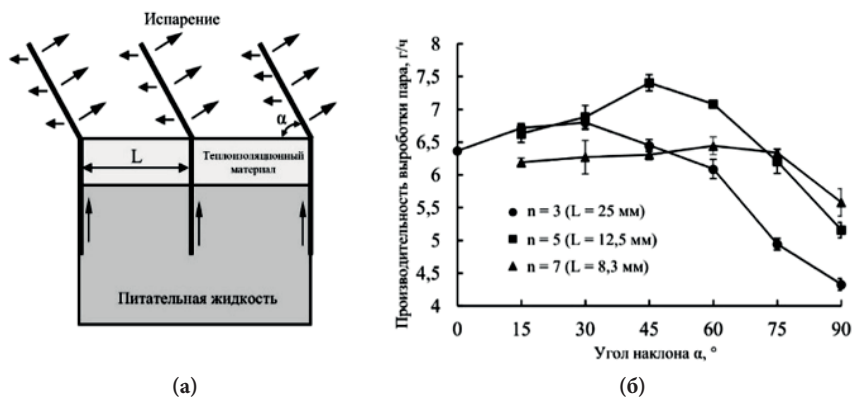


Рис. 1. Схема оптимизации зоны испарения на основе графен-гидрогелевых мембран (а); производительность выработки пара (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФН (грант 23-19-00840).

Литература

1. Q.T. Tran, I.A. Mikhailova. Cost-effective graphene-based 2D solar evaporator for high-efficiency water purification and desalination // Solar Energy, 298 (2025) 113736.

*А.Г. Аскеров, студ.; рук. И.А. Михайлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
науч. конс. Д.С. Лукоянов (СП «Квантовые технологии»)*

ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Si_3N_4 ДЛЯ МИКРО И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Формирование многослойных структур с промежуточными высоковольтно-производимыми диэлектрическими слоями является актуальной задачей для большинства приложений микро- и нанoeлектроники. Особое значение приобретает технология низкотемпературного осаждения тонких пленок нитрида кремния, обладающих высокими диэлектрическими и барьерными свойствами.

Цель настоящей работы — оптимизация режимов плазмохимического осаждения (PECVD) пленок Si_3N_4 толщиной 50–300 нм с равномерностью не менее 95% и механическими напряжениями до 300 МПа для применения в качестве межслойного диэлектрика и пассивирующего покрытия.

Метод PECVD является основным в получении высококачественных пленок нитрида кремния в микроэлектронике и нанотехнологиях. В работе апробирован процесс нанесения Si_3N_4 на установках для 200-мм стандарта SEMI с системой шлюзовой загрузки, обеспечивающей осаждение аморфных пленок при температурах 250–400°C. Процесс основан на разложении плeнкообразующих газов (например, SiH_4 и NH_3) в плазме тлеющего разряда с емкостной связью, при этом свойства образующейся пленки контролируются составом газовой смеси, температурой подложки и параметрами ионной бомбардировки.

Толщина и оптические свойства пленок измеряются рефлектметром с погрешностью до 1% от номинальной толщины диэлектрика (1–5 нм). Для анализа структуры и топографии используется сканирующий электронный микроскоп с нанометровым разрешением. Интеграция оборудования обеспечивает полный цикл производства и контроля пленок Si_3N_4 с высокой воспроизводимостью и точностью для получения полупроводниковых устройств.

Литература

1. Григорьев Е.Ю., Соколов А.С. Контроль параметров тонких пленок в полупроводниковом производстве // Датчики и системы. — 2020. — № 5. — С. 45–52.
2. Milella A. et al. PECVD of Silicon-Based Coatings for 2D and 3D Structures in MEMS and NEMS // Coatings. — 2022. — Vol. 12. — No. 2. — P. 135.

*А.М. Рачабеков, студ.; рук. И.А. Михайлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»),
науч. конс. П.А. Ромахин (СП«Квантовые технологии»)*

ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК SiO_2 ДЛЯ МИКРО И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Формирование многослойных структур с промежуточными высоко воспроизводимыми диэлектрическими слоями актуально для большинства задач микро и нанoeлектроники, при этом критически важной является технология низкотемпературного осаждения тонких пленок SiO_2 .

Цель настоящей работы — оптимизация режимов PECVD-осаждения пленок SiO_2 толщиной 100–500 нм с равномерностью не менее 95% и механическими напряжениями до 200 МПа для применения в качестве межслойного диэлектрика.

Метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) является ключевой технологией получения высококачественных пленок оксида кремния в микроэлектронике и нанотехнологиях. Апробирован процесс нанесения SiO_2 на установках для 200 мм стандарта SEMI с системой шлюзовой загрузки, обеспечивающей осаждение аморфных пленок при 300–400°C. Процесс основан на разложении плёнообразующего газа в плазме тлеющего разряда с емкостной связью, при этом свойства образующейся пленки контролируются составом газовой смеси, температурой подложки и параметрами ионной бомбардировки.

Толщина и оптические свойства пленок измеряются рефлектометром с погрешностью до 1% от номинальной толщины диэлектрика (1–5 нм). Для анализа структуры и топографии используется сканирующий электронный микроскоп с нанометровым разрешением. Интеграция оборудования обеспечивает полный цикл производства и контроля пленок SiO_2 с высокой воспроизводимостью и точностью для получения полупроводниковых устройств.

Литература

1. Григорьев Е.Ю., Соколов А.С. Контроль параметров тонких пленок в полупроводниковом производстве // Датчики и системы. — 2020. — № 5. — С. 45–52.
2. Milella A. et al. PECVD of Silicon-Based Coatings for 2D and 3D Structures in MEMS and NEMS // Coatings. — 2022. — Vol. 12. — No. 2. — P. 135.

В.С. Терешкин, асп.; рук. В.Ю. Левашов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СВЕРХЗВУКОВОГО ИСТЕЧЕНИЯ АРГОНА В ВАКУУМ

В связи с активным использованием конденсации в сверхзвуковых течениях в практических приложениях (извлечение чистого диоксида углерода, получение наноструктурированных плёнок металлов), интерес к описанию этого процесса не ослабевает.

Классическим способом описания течения потока пара с учётом влияния конденсации на его параметры являются уравнения механики сплошной среды, дополненные системой моментных уравнений функции распределения капель по размерам [1]. Нижней границей применимости такого подхода является невозможность описания нуклеации при степенях пересыщения (отношения парциального давления пара к его давлению насыщения), близких к единице, т.к. при таких условиях классическая теория нуклеации предсказывает бесконечно большой размер критического зародыша. Верхней границей применимости может выступать сильно пресыщенный пар, в котором предсказываемый критический зародыш может состоять из нескольких атомов.

Альтернативным подходом могут выступать методы молекулярной динамики [2]. Атомистическое моделирование позволяет избежать необходимости решения кинетического уравнения, получая распределение кластеров из первых принципов. Для определения кластеров могут быть использованы различные подходы, некоторые из которых представлены в работе [3].

Рассматривается вытянутая вдоль координаты x область, в которую с одной стороны поступает пересыщенный пар, а с другой применяется вакуумное условие (атомы удаляются). На первом этапе моделирования достигался стационарный профиль течения, при котором параметры течения не изменялись во времени. На втором этапе система подвергалась кластерному анализу, результатом которого является усреднённое по времени распределение кластеров.

Литература

1. **Сидоров А.А., Ястребов А.К.** Управление интенсивностью объемной конденсации в холодильной турбинной ступени радиального типа путем изменения начальной температуры // Теплоэнергетика, 2025, № 5, С. 59–72.
2. **Rapaport D.C.** The Art of Molecular Dynamics Simulation. 2-е изд. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
3. **N. Sator** Clusters in simple fluids // Physics Reports (2003) V. 376. N. 1. P. 1–39. Doi: 10.1016/s0370-1573(02)00583-5

*А.М. Завгородняя, студ.; Т.Д. Серегин, студ.; Т.В. Пушкин, студ.;
М.К. Шишкин, студ.; рук. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., проф.*

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ МОЛИБДЕНОВЫХ ЗЕРКАЛ В ТОКАМАКЕ EAST: УГРОЗА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

В токамаке EAST для детектирования состояния плазмы используют систему зеркал, установленных для передачи излучения от плазмы к измерительной температуре. В качестве материала ретрорефлектора был принят молибден из-за его низкого коэффициента распыления ионами водорода в интервале энергий 50–100 эВ.

В период 10-часового отсутствия плазменных зарядов молибден активно окисляется под действием наличия воды (не менее 5%) в остаточном вакууме. Подобное разрушение испытывал на себе вольфрам в процессе циклов оксидирования и удаления оксидов в экспериментах И. Ленгмюра. Аналогично в результате плазменного воздействия происходит очистка поверхности от оксидного слоя и подготовка материала к новому этапу оксидирования за счет дефектообразования и насыщения поверхности зеркала водородом [1].

Неровности разрушенной поверхности имеют масштабы в более сотни мкм. Под воздействием дейтериевых ионов с энергией более 300 эВ образуются дефекты, которые становятся центрами оксидирования. Также оксидирование прошло по межкристаллитным направлениям зерен молибдена [2].

Локальный рентгеноспектральный анализ показал наличие молибдена и кислорода на глубине 90 нм. Во избежание разрушения необходимо предотвратить процессы поглощения образцом водорода и окисления поверхности.

Литература

1. **Lobanova L.G. et al.** The plasma-chemical mechanism of surface destruction of the diagnostic system components inside EAST vacuum vessel // *Nuclear Materials and Energy*. — 2025. V.43. — P.101938.
2. **Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Семенов-Шефов М.А., Федорович С.Д., Wang S., Zhang. L., Liu H.** Плазмохимическое разрушение молибдена как материала “первого зеркала” токамака EAST // *Быстрозакаленные материалы и покрытия: Тр. XXII-й международной научно-технической конф. М: МАИ, 2025.* — С. 216–130.

*А.М. Завгородняя, студ.; Т.Д. Серегин, студ.; Т.В. Пушкин, студ.;
М.К. Шишкин, студ.; рук. В.П. Афанасьев., д.ф.-м.н., проф.*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФИТА МАРКИ МПГ-8 С ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ НА ТОКАМАКЕ EAST: ОБРАЗОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

Благодаря своим механическим свойствам алмазоподобные покрытия нашли широкое применения во многих технологических областях. Базовыми методами получения алмазоподобных пленок считаются химическое газофазное и физические осаждения [1].

При длительном использовании графита типа МПГ-8 в роли внутреннего защитного материала токамака EAST было выявлено возникновение алмазоподобного покрытия (АПП) на поверхности. При анализе под электронным микроскопом было выявлено сильное различие от представленных ранее вариантов структуры в литературе [2], так как АПП оказалась россыпью кристаллов разных размеров и форм.

РФЭС анализ показал наличие увеличенной ширины 1s пика C, обусловленной произрастанием sp^2 и sp^3 гибридизаций, а также наличием углеводородов.

Основные изменения графитовой мишени происходили на поверхности. Существование АПП на поверхности порождает зарядку образца и разряды, разрушающие поверхность. При легировании материала титаном возможно увеличение электропроводности на 8 порядков [3].

Литература

1. **Иванов А.** Технология напыления тонких пленок // Современная светотехника — 2010, №1. — С. 45–48.
2. **Robertson J.** Diamond-like amorphous carbon // Mater. Sci. Eng., R. — 2002. № 4–6. — P. 129–281.
3. **Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Семенов-Шефов М.А., Волкова Л.С., Едельбекова П.А., Yuan S., Zhang. L., Liu H.** Формирование алмазоподобных покрытий на графите в результате взаимодействия с дейтериевой плазмой в токамаке EAST // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Тр. XXII-й международной научно-технической конф. М: МАИ, 2025.

М.В. Воронцов, студ.; рук. П.Г. Макаров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАСТ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНОВОГО МАСЛА С ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ

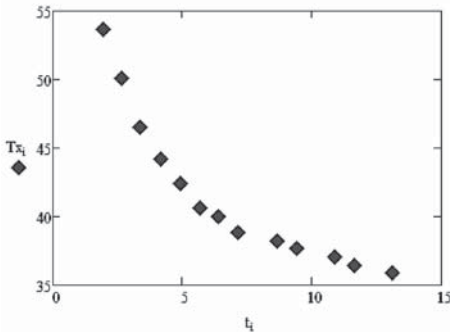


Рис. 1. Динамика остывания тонкой металлической проволоки в исследуемой среде

поверхностей термопасты — пластичного теплопроводящего вещества, которое будет заполнять все микроскопические неровности, заменяя воздух на хороший теплопроводящий материал.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния различных концентраций оксидов металлов (в частности ZnO) в силиконовом масле, служащем в качестве полимерной матрицы, на теплопроводность и вязкость итоговой смеси. Это позволит найти оптимальные соотношения компонентов для улучшения теплопроводящих свойств функционального материала.

Измерение коэффициента теплопроводности проводилось нестационарным методом горячей проволоки. При пропускании тока через нихромовую проволоку, помещенную в сосуд с веществом, происходит её нагревание. К концам проволоки подключен омметр для измерения сопротивления. По результатам экспериментов с учётом термического коэффициента сопротивления получены графики динамики изменения температуры измеряемой среды (рис. 1), из которых можно получить данные о теплопроводности смеси.

Литература

1. А.А. Федоров. Метод нагреваемой нити для измерения теплопроводности вязких жидкостей. Вестник Международной академии холода № 3, 2022.
2. Пол Дрекседж. Применение термопасты в силовой электронике. Силовая электроника, № 6'2018.

*А.Д. Купцов, асп.; Аунг Лин Хтай, асп;
рук. С.В. Сидорова, к.т.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)*

ОЦЕНКА ПАРЦИАЛЬНОГО СОСТАВА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ В ВАКУУМЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР С НАГРЕВОМ

Наноэлектроника, как область техники, производит устройства, работа которых основана на структурах размером менее 100 нм. В этом диапазоне даже паровые и летучие молекулы загрязнений критичны, так как их размер сопоставим с характеристическими размерами наноразмерных тонких пленок. Феноменологические свойства материалов и уникальные характеристики устройств возможно обеспечить благодаря осаждению островковых наноструктур в вакууме [1].

Целью работы является разработка способа снижения остаточных загрязнений в вакуумной камере с помощью управления температурой.

Установлено, что молекулярные загрязнения размером от 0,3 до 20,0 нм (вода, углеводороды, CO₂) критически влияют на формирование наноструктур, нарушая процессы их нуклеации и роста.

Составлена комплексная классификация остаточных загрязнений по происхождению (внешние и внутренние), физико-химическим свойствам (газообразные, молекулярные, частичные) и причинам возникновения (технологические и эксплуатационные). Выявлены основные источники загрязнений: материалы конструкции (полимеры, резины), смазочные материалы и операции обслуживания.

Эффективным способом борьбы с остаточными загрязнениями в вакуумной камере является нагрев поверхностей для десорбции молекул и последующей откачки из объема камеры. Весь технологический и исследовательский цикл возможно провести на лабораторной установке МВТУ-11-1МС с нагревателями [2], работающими по принципу нагрева теплопроводностью и ИК-излучением. Контроль чистоты среды проводится с помощью квадрупольного масс-спектрометра Extorr XT200.

Получены спектральные характеристики фона вакуумной камеры до и после процесса осаждения без и при наличии нагрева до 300°C. Результаты показывают, что системный контроль чистоты вакуумной среды является необходимым условием для воспроизводимого получения высококачественных наноразмерных покрытий.

Литература

1. **Сидорова С.В.** и др. Контроль роста островковых наноструктур в вакууме // Наноинженерия. — 2012. — №. 9. — С. 8–11.
2. **Sidorova S.V.** и др. Automatic Heating Technology Module //2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — IEEE, 2024. — С. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479951.

М.Ю. Сеничкин, студ.;
рук. Д.А. Коновалов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОЖИДКОСТЕЙ В КОМПАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

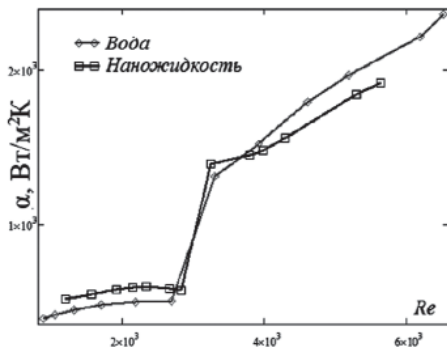


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Re (Al_2O_3)

ников с удельным тепловыделением достаточно оправдано, поскольку жидкости на основе частиц Al_2O_3 и SiO_2 , обладают большим коэффициентом теплопроводности [1] по сравнению с чистыми и обеспечивают более высокие коэффициенты теплоотдачи в ламинарном режиме течения (рис.1).

В работе выполнен расчет теплообмена в компактном теплообменнике с применением наножидкости, показано увеличение удельного теплосъема от теплонапряженной поверхности, проведено сравнение с данными для чистого теплоносителя.

Литература

1. А.В. Минаков, Д.В. Гузей, А.С. Лобасова, Д.А. Дектерев, М.И. Пряжников. Расчетно-экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе оксида алюминия в прямоточном теплообменнике // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 1 (2014 7) 32–47.

Д.В. Воробьев, асп.; рук. П.Г. Макаров, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОТ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ

Проблема эффективного теплоотвода и точного термостатирования в опто-электронных устройствах приобретает критическую важность на фоне миниатюризации компонентов при одновременном росте их мощности. Данная тенденция приводит к резкому увеличению плотности тепловых потоков. Поскольку ключевые эксплуатационные параметры, такие как выходная мощность, стабильность длины волны и срок службы, имеют прямую зависимость от температуры, поддержание оптимального теплового режима становится обязательным условием надежной работы. Сложность задачи придают расширенные современные требования к температурному диапазону эксплуатации — от экстремально низких -60°C до высоких 125°C [1–3], — что предъявляет повышенные требования к производительности и энергоэффективности систем охлаждения, среди которых термоэлектрические модули занимают важное место.

В статье представлены результаты комплексного экспериментального исследования, направленного на анализ энергетической эффективности термоэлектрических модулей. Исследование сфокусировано на сравнительном анализе модулей и влиянии материала и геометрии керамических подложек, выполняющих роль критически важных теплообменных интерфейсов. Ключевым параметром оценки эффективности является холодильный коэффициент (COP), который определялся в широком диапазоне тепловых нагрузок и рабочих температур. Основная задача заключалась в количественной оценке влияния подложек из оксида алюминия Al_2O_3 и нитрида алюминия AlN на эффективность термоэлектрических модулей.

По итогам исследования проведено детальное сравнение модулей, что позволяет сформулировать рекомендации по выбору оптимальной конфигурации термоэлектрического модуля для конкретных условий эксплуатации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Литература

1. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. **Je-Hyeong B., Favaloro T. and Shakouri A.** 2013 Thin-film thermoelectric characterization techniques Annu. Rev. Heat Transfer 16 51–99.
3. **X. Shi, J. Zou, Z. Chen.** Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices, Chem. Rev. 120 (2020) 7399–7515.

Направление IX
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА
Thermal power engineering

Руководитель направления:

Директор института тепловой
и атомной энергетики НИУ «МЭИ»,
д.т.н., член-корр. РАН
Дедов Алексей Викторович

Секция 47
КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
Boiler installations
and environment protection

Председатель секции: д.т.н., профессор Тупов Владимир Борисович

Секретарь секции: Мухаметов Айнур Булатович

Д.А. Павлов, асп.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СНИЖЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВОРОТА НАПРАВЛЯЮЩИМИ ПЛАСТИНАМИ

Работа энергетических газозовдухопроводов часто превышает санитарные нормы шума на территории энергообъекта и в окружающем районе. Превышение зависит от многих факторов и может достигать десятков дБ. Это требует шумоглушения. Снижение шума достигается установкой глушителей или облицовкой звукопоглощающим материалом поворотов. Однако это увеличивает аэродинамическое сопротивление [1, 2].

Перспективным решением является установка направляющих пластин на поворотах, которые снижают шум и сопротивление. Цель работы — сравнить эффективность направляющих звукопоглощающих пластин различной толщины. В рамках работы были выполнены математические моделирования снижения шума, а также изменения аэродинамического сопротивления, в программах Ansys и Comsol. В работе рассмотрен прямой скругленный поворот, в который устанавливаются концентрические направляющие пластины постоянного сечения, канала квадратного сечения со сторонами 4 м с толщинами пластин 100 мм, 200 мм и 400 мм. В ходе анализа, проведенного с использованием результатов аэродинамического расчета, было установлено, что наибольшее снижение аэродинамического сопротивления достигается при использовании пластины толщиной 100 мм, наименьшее при толщине 400 мм по сравнению со сопротивлением свободного поворота, за счет уменьшения застойной зоны, образующейся у внутренней стенки канала в момент поворота, а также после него [3]. По результатам моделирования затухания шума в повороте с установкой направляющей пластины дополнительное снижение шума для всех толщин пластин составляет 3 дБА.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду / В.Б. Тупов. — М. — Издательский дом МЭИ, 2012. — 284 с.
2. **Тупов В.Б., Тупов Б.В.** Снижение шума тягодутьевых машин абсорбционными глушителями // Электрические станции. — 2017. — №. 4. — С. 46–50.
3. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — Рипол Классик, 2013. — 468 с.

О.А. Островская, маг.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СНИЖЕНИЕ ШУМА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проблема шумового воздействия трансформаторов на тепловых электроцентралях (ТЭЦ) остаётся актуальной ввиду значительного уровня генерируемого ими шума — до 80–100 дБ [1]. Такое акустическое воздействие не только создаёт неблагоприятные условия для работы персонала, но и превышает санитарные нормы в прилегающих жилых зонах.

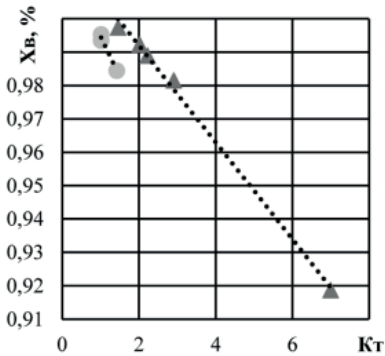
Основные источники шума трансформатора — это магнитострикция сердечника — деформация ферромагнитного материала под действием переменного магнитного поля, порождающая низкочастотный шум в диапазоне 100–400 Гц. Дополнительно шум от вибрации обмоток и конструктивных элементов; а также от систем охлаждения (вентиляторы, насосы) и от механических резонансов из-за колебания корпуса, креплений и смежных конструкций [1, 2]. Выполнен анализ возможных конструктивных и технологических мероприятий по снижению шума. Среди конструктивных решений: использование аморфных сплавов или текстурированной стали для сердечника; оптимизация геометрии магнитопровода (например, скошенные стыки и демпфирующие прокладки); жёсткое крепление обмоток и сердечника; монтаж звукоизолирующих кожухов из многослойных панелей с поглощающими материалами; виброизоляция трансформатора от фундамента посредством резиновых или пружинных опор. Технологические методы включают: регулировку нагрузки с работой в оптимальном мощностном диапазоне (во избежание перегрузок, усиливающих вибрации); балансировку вентиляторов и насосов системы охлаждения; регулярную диагностику — контроль затяжки креплений, состояния подшипников и уровня масла. На ТЭЦ более эффективны меры акустической защиты: установка звукоизолирующих перегородок между трансформаторами и рабочими зонами; облицовка стен и потолков в помещениях с трансформаторами звукопоглощающими материалами; размещение трансформаторов в отдельных звукоизолированных блоках. Современные инновационные решения открывают новые перспективы: нанопокрывтия для демпфирования вибраций на поверхностях трансформатора; цифровое моделирование акустических полей для оптимизации размещения оборудования [2].

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду / В.Б. Тупов. — М. — Издательский дом МЭИ, 2012. — 284 с.
2. **Ruchi Negi, Prateek Singh, Gaurav Kr. Shah,** Causes of Noise Generation & its Mitigation in Transformer/ International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 5, May 2013.

В.Д. Апаров, асп.; С.Л. Чернов, к.т.н., доц. (НИУ «МИЭ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ВЫГОРАНИЯ ОТ ТОПЛИВНОГО ОТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТНЫХ БУРЫХ И КАМЕННЫХ УГЛЕЙ



Секция 48

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЭС И АЭС **Water and fuel technologies for thermal power** **plants (TPP) and nuclear power plants (NPP)**

Председатель секции: к.т.н., доцент Егошина Ольга Вадимовна

Секретарь секции: к.т.н. Большакова Наталия Алексеевна

Е.А. Быковский, асп.; рук. И.А. Бураков, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВ БРИКЕТИРОВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Несмотря на растущую роль газа, уголь остается критически важным топливом для энергетики, металлургии и химической промышленности России. Накопление огромных объемов угольной мелочи и шламов на местах добычи приводит к серьезным экологическим проблемам: загрязнению почв, водоемов (закисление) и атмосферы (угольная пыль, выбросы при сжигании). Это обуславливает высокую актуальность разработки эффективных технологий переработки низкосортного угольного сырья в безопасное и энергоэффективное топливо, такой как брикетирование [1].

Проведен комплексный аналитический обзор и сравнительная оценка двух основных способов брикетирования угля: 1) без связующих веществ при высоком давлении («технология белого угля») и 2) с применением связующих (органики, цемента, глины) при средних давлениях [2, 3]. Систематизированы преимущества и недостатки каждого метода, а также конкретных технологических решений, защищенных патентами. Выявлены ключевые технологические барьеры, препятствующие широкому внедрению существующих методов: низкая механическая прочность и влагостойкость продукта, высокая себестоимость и энергоемкость производства.

Результаты аналитического обзора формируют научно-техническую базу для перспективных исследований и разработок в области брикетирования. Полученные выводы указывают на целесообразность работ по созданию новых эффективных и недорогих рецептур связующих веществ, оптимизации параметров прессования, а также разработке энергосберегающего оборудования. Внедрение усовершенствованных технологий брикетирования позволит перерабатывать угольные отходы в высококачественное бездымное топливо, снизив экологическую нагрузку и повысив экономическую эффективность угольной отрасли.

Литература

1. **Яблокова М.А., Пономаренко Е.А., Георгиевский Н.В.** Современные технологии и оборудование для утилизации мелких нетоварных фракций нефтяного кокса (обзор) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — 2016. — №. 34 (60). — С. 67–78.
2. **Крохин В.Н.** Брикетирование углей // М.: Недра. — 1974. — 216 с.
3. **КИМ С.В. и др.** Исследование процесса полукоксования углей для получения бездымного топлива // Труды университета. — 2018. — №. 4. — С. 34–37.

Д.С. Прирез, асп.; рук. С.Л. Громов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНГИБИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТИСКАЛАНТОВ С ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МЕТКОЙ

Актуальность задач минимизации рисков формирования твердой фазы мало-растворимых соединений на поверхности мембран установок обратного осмоса не только не теряет своей значимости, но и все больше возрастает с каждым днем.

Трудности решения представленной задачи обусловлены фундаментальными ограничениями существующих теоретических моделей, которые не в полной мере описывают механизмы зарождения и роста кристаллов, а также принципы действия ингибиторов, предотвращающих данный процесс. Как итог, отсутствие целостной прогностической модели не позволяет эффективно управлять рисками солеотложений на практике.

Несмотря на длительные и интенсивные исследования в области теории кристаллизации и ингибирования, сохраняется разрыв между теоретическими моделями и экспериментальными данными. Создаваемые теоретические модели, способные объяснить большую часть известных закономерностей, регулярно сталкиваются с новыми эмпирическими фактами, которые противоречат их базовым принципам [1].

Ключевой проблемой на пути создания адекватных теоретических моделей является недостаток прямых экспериментальных данных о поведении ингибиторов в реальных условиях обратноосмотических установок. Традиционно применяемые методы экспериментов для определения эффективности или механизма действия ингибиторов не позволяют отслеживать распределение и адсорбцию на поверхности мембраны.

В связи с этим, целью настоящей работы является разработка и апробация принципиально нового метода изучения механизмов ингибирования в системах обратного осмоса с использованием антискалантов с флуоресцентной меткой. Данный подход открывает возможность визуализировать и оценивать процессы, происходящие при реальной работе обратноосмотических установок [2].

Литература

1. **Oshchepkov M.S., Popov K.I.** Mechanisms of scale inhibition derived from a fluorescent-tagged antiscalant visualization // *Water-Formed Deposits*. — Elsevier, 2022. — С. 765–782.
2. **Oshchepkov M. et al.** Visualization of a novel fluorescent-tagged bisphosphonate behavior during reverse osmosis desalination of water with high sulfate content // *Separation and Purification Technology*. — 2021. — Т. 255. — С. 117382.

А.П. Михеев, асп.; рук. Е.А. Селиванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭРОЗИИ-КОРРОЗИИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И АЭС

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является доминирующей причиной выхода из строя элементов оборудования и трубопроводов вторых контуров АЭС и ТЭС. Интенсивность ЭКИ в значительной степени определяется параметрами водно-химического режима, ключевым из которых является водородный показатель (рН) рабочей среды [1–3].

Правильный учет влияния рН критически важен для прогнозирования износа. В работе проведен анализ существующих физико-химических моделей и расчетных кодов, явно учитывающих данный параметр. Показано, что в основе механизма ЭКИ лежат процессы формирования и растворения защитного оксидного слоя (магнетита), скорость которых напрямую зависит от рН. Установлено, что даже незначительное снижение рНt на 1–2% может приводить к росту скорости ЭКИ на 15–20% для критических участков трубопроводов.

Рассмотрены модели, заложенные в основу прогнозных кодов:

- Модель Кастнера включает расчет скорости ЭКИ с учетом рН в однофазном потоке.
- Модель Санчеса-Калдера описывает скорость ЭКИ с учетом рН в двухфазном потоке.
- Модели в кодах (CHECWORKS, COMSY, РАМЭК) используют мультипликативный принцип с рН как ключевым фактором.

Проведенный анализ показывает, что модель у российского кода РАМЭК наиболее адекватна, она учитывает взаимное влияние параметров, включая зависимость растворимости магнетита от температуры и рН.

Модель из данного кода можно рекомендовать для решения практических задач прогнозирования ЭКИ и оптимизации водно-химических режимов АЭС и ТЭС.

Литература

1. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследования, прогнозирование и предупреждение. Ч. 1 // Теплоэнергетика. — 2018. — № 8.
2. **Томаров Г.В., Шипков А.А., Комиссарова Т.Н.** Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследования, прогнозирование и предупреждение. Ч. 2 // Теплоэнергетика. — 2018. — № 8.
3. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Эрозионно-коррозионный вынос железосодержащих соединений — источник отложений в парогенераторах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. — 2011. — № 3.

Х.К. Йе, асп.; рук. И.А.Бураков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В РАМКАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

На сегодняшний день одной из актуальных задач в энергетике является повышение эффективности и экологической безопасности процессов переработки твердого топлива в рамках функционирования энерготехнологических комплексов. Ситуация усугубляется ужесточением экологических норм и необходимостью утилизации различных видов углеродсодержащих отходов. В этих условиях технология газификации топлива [1] представляется перспективной альтернативой традиционному прямому сжиганию.

В докладе рассматриваются процессы газификации угля, протекающие при высоких температурах в условиях ограниченного доступа кислорода. В результате [1] данных процессов исходное твердое топливо преобразуется в горючий синтез-газ, основными горючими компонентами которого являются СО и H_2 . Далее синтез-газ может быть использован для выработки электроэнергии или как химическое сырье. Преимуществами газификации являются: снижение выбросов загрязняющих веществ (серы, азота, твердых частиц) по сравнению с прямым сжиганием, возможность использования различных видов топлива, в том числе низкосортных, и получение ценных побочных продуктов, таких как техническая сера. Широкое внедрение технологии сдерживается ее высокой капиталоемкостью и наличием нерешенных технических проблем.

Технология газификации [2] является одним из наиболее экологичных способов переработки угля и подходит для регионов, стремящихся снизить воздействие на окружающую среду и диверсифицировать топливный баланс. Несмотря на существующие экономические и технические барьеры, ее потенциал в контексте чистой энергетики остается высоким.

Литература

1. **Белосельский Б.С.** Технология топлива и энергетических масел // М.: Издательство МЭИ. 2005. — 348 с.
2. **Minchener, A.J.** (2005). Coal gasification for advanced power generation. *Fuel*, 84(17), 2222–2235. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.035>.

А.Е. Герасименко, асп.;
рук. Ю.А. Морыганова, к.х.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ОТВАЛОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ КОМПЛЕКСА

Накопление отходов обогащения угля (хвостов) в угледобывающих регионах создаёт значительную экологическую нагрузку, включая загрязнение атмосферы, водных ресурсов и изъятие земель. При этом хвосты содержат недоизвлечённые металлы и имеют остаточную теплотворную способность, что позволяет рассматривать их как техногенное месторождение для комплексной утилизации [1, 2, 3]. В контексте теплоэнергетики актуальной задачей является разработка технологий, позволяющих одновременно утилизировать отходы, получать энергию и ценные продукты, сокращая объёмы складирования и негативного воздействия на окружающую среду.

На начальном этапе исследований проводится комплексный анализ потенциала угольных отвалов как объекта для энерготехнологической переработки. В отличие от подходов, рассматривающих лишь складирование или прямую рекультивацию, данная работа нацелена на оценку возможности создания мобильного комплекса, совмещающего функции получения энергоносителей и подготовки техногенного массива к последующей рекультивации. Предварительное оценивание технологических рисков и преимуществ гипотетического применения процесса подземной газификации, адаптированного для искусственного техногенного массива, как основы для будущей разработки мобильного комплекса.

Результаты начального анализа послужат фундаментом для дальнейших прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Дальнейшие исследования планируется направить на математическое моделирование процессов и лабораторные эксперименты по газификации образцов отвалов.

Литература

1. **Голик В.И.** К проблеме глубокой утилизации отходов обогащения угля // Уголь. 2025. № 5. С. 56–59.
2. **Голик В.И., Разорёнов Ю.И.** Хвосты обогащения угля как сырьё для производства строительных материалов // Сухие строительные смеси. 2013. № 4. С. 29–32.
3. **Шаймартданов Т.Э.** К проблеме рекультивации хранилищ хвостов обогащения углей Донбасса // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1, № 3. С. 53–64.

*М.Б. Урунду, студент;
рук. Ю.А. Морыганова, к.х.н., доц. (НИУ«МЭИ»)*

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМИНОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ВХР В КОНТУРАХ АЭС

На атомных электрических станциях с реакторами ВВЭР-1300 для коррекции pH теплоносителя вторичного контура применяют летучие амины, преимущественно этаноламин и морфолин. В рамках проведённого исследования была оценена возможность адаптации методики МУ 2911-83, изначально разработанной для анализа воздушной среды, к водным растворам с целью создания простого, оперативного и высокочувствительного метода контроля содержания летучих аминов.

Определение первичных аминов основано на их окислении гипохлоритом натрия в кислой среде. Избыточное количество гипохлорит-ионов, не вступивших в реакцию с аминами, взаимодействует с иодид-ионами, в результате чего протекает окислительно-восстановительная реакция с образованием элементарного иода. Выделившийся иод остаётся в растворе и образует с крахмалом устойчивый синеокрашенный комплекс. Для ускорения протекания реакции в качестве реакционной среды используется 6%-й раствор гидрокарбоната натрия. Оптическую плотность окрашенных растворов измеряют спектрофотометрически при длине волны 550 нм. Количественное содержание амина в анализируемой пробе определяют по заранее построенному градуировочному графику.

На графике представлены линейные калибровочные зависимости для стандартных растворов с содержанием аминов в диапазоне 0–20 мкг. Высокие значения коэффициента корреляции ($R^2 \approx 0,99$) подтверждают линейный характер зависимости, а также указывают на высокую точность и воспроизводимость разработанной методики. Полученные результаты демонстрируют, что адаптированная методика может быть эффективно использована для экспресс-контроля концентрации этаноламина и морфолина в водных средах как в лабораторных условиях, так и при производственном мониторинге.

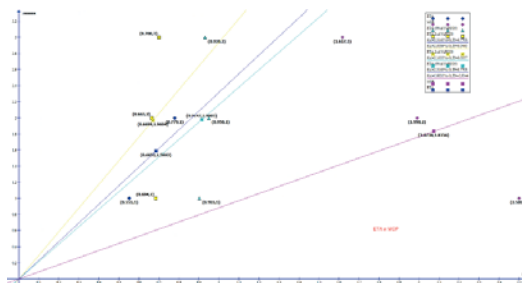


Рис. 1. Калибровочная кривая фотометрического определения этаноламина и морфолина в диапазоне 0–20 мкг

Литература

1. МУ 2911-83. Методические указания по фотометрическому измерению концентрации третичных жирных аминов и аминоспиртов в воздухе рабочей зоны. М.: Минздрав СССР, 1984. 13 с.

Ш.Б. Уджар, студент; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ КОРРОЗИИ СТАЛЕЙ

Коррозия конструкционных сталей в хлоридсодержащих средах остаётся одной из проблем в энергетике. Целью работы является построение и верификация численной модели коррозии в водных растворах NaCl с использованием программы COMSOL Multiphysics.

Для моделирования использовался физический интерфейс, описывающий распределение потенциала и плотности тока с учётом омических потерь и электрохимической кинетики. Входные данные представлены собой значения плотности коррозионного тока, извлечённые из международных научных публикаций для сталей 20 и SS304. Скорости коррозии рассчитаны на основе закона Фарадея с использованием электродных эквивалентов и плотности материалов.

Экспериментальная верификация выполнена на данных, полученных методом экстраполяции тафелевских участков в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке. Для стали 20 экспериментальные значения составили 6,695 мкА/см² (1 сутки), для стали 00X18M2B — 1,593 мкА/см². Данные эксперимента использовались для проверки модели.

Результаты моделирования показали высокую степень совпадения с [2]. Для стали 20 при 303 К получена плотность тока с помощью COMSOL 7,44 мкА/см², что согласуется со статьёй [2] — 7,44 мкА/см², и находится в допустимом расхождении с экспериментом (6,695 мкА/см²). Скорость коррозии составила 0,0866 мм/год, что также совпадает с литературой [2]. Для стали SS304 при 293 К модель дала 4,4 мкА/см² — полное совпадение с [1], в результате эксперимента (1 сутки) получено 1,593 мкА/см².

Сравнительный анализ подтверждает, что разработанная модель достоверно воспроизводит кинетику коррозии сталей в растворах NaCl и предназначена для прогнозирования коррозии металла трубопроводов АЭС. Модель обеспечивает корректное описание закономерностей влияния температуры и служит основой для дальнейшего расширения расчётных условий.

Литература

1. **Shakir I.K., Alsamurraee A.K.M., Saleh S.M.** Pitting corrosion behavior of 304 SS and 316 SS alloys in aqueous chloride and bromide solutions.
2. **Klapper H.S., Laverde D., Vasquez C.** Evaluation of the corrosion of UNS G10200 steel in aerated brines under hydrodynamic conditions.

И.С. Куньщиков, асп.;

рук. А.Ю. Рябчиков, д.т.н., проф. (УрФУ, Екатеринбург)

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗНАСОСНОЙ СХЕМЫ УДАЛЕНИЯ ВОЗДУХА ИЗ ВАКУУМНОГО ДЕАЭРАТОРА С ВОДОСТРУЙНЫМ ЭЖЕКТОРОМ

Противокоррозионная обработка подпиточной воды теплосети, как правило, осуществляется путем применения вакуумных деаэраторов [1]. Качество деаэрированной воды зависит как от режима эксплуатации деаэратора, так и от эффективности работы воздухоотсасывающего устройства.

В качестве воздухоотсасывающих устройств применяют пароструйные и водоструйные эжекторы. В схемах с водоструйным эжектором вода после эжектора поступает в бак-газоотделитель, из которого насосом откачивается в деаэратор. При этом бак-газоотделитель должен устанавливаться на 5–7 метров ниже эжектора [2].

В работе представлена новая безнасосная схема удаления воздуха из вакуумного деаэратора, введенная в эксплуатацию на ТЭЦ в Свердловской области. В этой схеме бак-газоотделитель установлен на отметке деаэратора, а вода из бака самотеком отводится в деаэратор. Представлены результаты испытаний, разработанного для данной схемы водоструйного эжектора при разных расходах рабочей воды; распределение давлений по тракту эжектора. Приведены результаты исследований и анализ динамических процессов, протекающих в водоструйном эжекторе. Приведены результаты испытаний новой схемы при различных расходах греющей среды и деаэрируемой воды. Представлен анализ надежности (устойчивости) работы гидрозатвора в схеме отвода воды из бака-газоотделителя в деаэратор при различном перепаде давления между ними. Даны рекомендации по выбору высоты гидрозатвора и установки эжектора. Сформулированы выводы об эффективности применения безнасосной схемы удаления воздуха с водоструйным эжектором из вакуумного деаэратора. Представлено также сравнение стандартной и новой схемы удаления воздуха из вакуумного деаэратора.

Литература

1. **Справочно-информационные материалы** по применению вакуумных деаэраторов для обработки подпиточной воды систем централизованного теплоснабжения — М.: СПО ОРГРЭС, 1997.
2. **Расчет** и проектирование термических деаэраторов: РТМ 108.030.21-78. М.: НПО ЦКТИ, 1979.

Г.А. Вершинин, студ.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ТЭС

Повышение эксплуатационной надёжности и экономичности энергоблоков ТЭС является важной задачей современной энергетики. Одним из наиболее уязвимых элементов является конденсатор, состояние которого напрямую влияет на вакуум в системе. Раннее обнаружение увеличения расхода присосов охлаждающей воды необходимо для предотвращения развития процесса коррозии в тракте энергоблока. Существующие системы мониторинга, направленные на контроль водно-химического режима, требуют установки комплекса датчиков. Существует потребность в создании методов мониторинга, расширяющих функционал подобных систем и сокращающих объем используемого в них измерительного оборудования [1]. Целью работы является разработка программного обеспечения для предотвращения нарушений водно-химического режима, возникающих по причине неплотностей в конденсаторе.

В основе программного обеспечения лежат динамические математические модели конденсатора, деаэратора и котла, позволяющие оценивать расход присосов охлаждающей воды и изменения концентрации примеси [1, 2]. Разработанный прототип, осуществляет расчет концентраций примесей по тракту энергоблока, на основе изменения расхода присосов в конденсаторе, для оперативного прогнозирования развития нарушений. Реализована визуализация переходных процессов, анализ тренда изменения концентрации примеси и автоматическая оценка технического состояния конденсатора. Программная реализация системы раннего выявления нарушений ВХР позволяет осуществлять комплексную оценку состояния рабочей среды в реальном времени, повышать достоверность диагностики за счет мультипараметрического анализа.

Литература

1. Егошина О.В., Звонарева С.К., Большакова Н.А. Методы диагностики и прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока в системах химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 49–56.
2. Тет Вей Лин. Разработка алгоритмов для диагностики ионного состава теплоносителя в системах химико-технологического мониторинга на ТЭС: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2021.

А.И. Мансуров, студ.; С.В. Григорьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)»

О ВЛИЯНИИ ПАВ НА КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ЛОПАТОК ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В настоящее время тренд на потребление электроэнергии увеличивается, в связи с чем, помимо вопроса о необходимости повышении генерирующих мощностей, становится актуальной задача повышения эффективности, надежности и ресурса энергетического оборудования. Паровая турбина в составе энергоблока должна обеспечивать максимально возможное использование тепловой энергии рабочего тела. Традиционно эксплуатация турбоагрегата сопряжена с работой ее последних ступеней в области фазового перехода, т.е. в области влажного пара. Возникающие капли влаги на больших скоростях соударяются с входными кромками лопаток, приводя к их коррозионно-эрозионному износу.

Анализ результатов исследований, посвященных способам повышения коррозионно-эрозионной стойкости лопаток последних ступеней, показал преобладание пассивных способов защиты, а именно нанесение износостойких покрытий и упрочнение поверхности лопаток. Однако, данные способы не направлены на устранение первоначальных причин коррозионно-эрозионного износа, связанных со свойствами теплоносителя (влажность, размер капель). Активные способы, непосредственно влияющие на эти факторы, в известных исследованиях представлены в меньшей степени. Среди активных способов защиты лидируют сепарационные устройства, направленные на удаление образовавшейся влаги для исключения ее срыва с образованием крупнодисперсной влаги. Способы управления размером капель в двухфазном потоке практически не рассматриваются, хотя этот фактор вносит существенный вклад в коррозионно-эрозионный износ и представляет собой перспективное направление для его снижения. Так в работе [1] для снижения размера капель использовался впрыск водной эмульсии октадециламина (ОДА) в перепускной паропровод между цилиндрами среднего и низкого давления. Испытания показали, что наибольший эффект достигался в периферийной части рабочих лопаток, наиболее подверженных эрозионному износу. Так для турбины К-300-240 было продемонстрировано уменьшение диаметр капель в этой области с 49 до 33 мкм до и с 86 до 40,5 мкм после последней ступени.

Литература

1. Куршаков А.В., Рыженков А.В., Рыженков О.В. Повышение надежности и экономичности ПТУ путем микродозирования ОДА в турбину // Надежность и безопасность энергетики, 2014, № 25.

А.А. Аслан, студент; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ РАСТВОРОВ С ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИМИ АМИНАМИ НА ОБМЕННУЮ ЁМКОСТЬ ИОНИТОВ

Во втором контуре энергоблоков с ВВЭР плёнообразующие и нейтрализующие амины применяются для снижения коррозии, стабилизации pH и формирования защитных плёнок на оборудовании [1]. Наряду с защитой металла, амины проявляют поверхностную активность по отношению к ионитам [1]. Поэтому влияние аминов на обменную способность смол остаётся важным аспектом водно-химического режима. Поскольку молекулы аминокислотных реагентов способны адсорбироваться на поверхности катионита и частично блокировать функциональные группы [1], необходимо учитывать условия, при которых такое взаимодействие приводит к снижению обменной ёмкости материалов в фильтрах второго контура АЭС.

Согласно литературным данным, соединения с отрицательно заряженными частицами слабее взаимодействуют со смолой, тогда как сами молекулы формируют поверхностный слой и снижают динамическую ёмкость при повышенных концентрациях [2].

В настоящей работе решена задача экспериментального определения предельных значений концентраций аминов при взаимодействии сильнокислотного катионита с аминокислотными растворами. Измерения pH, электропроводности и концентрации Ca^{2+} до и после фильтра показали, что концентрации аминов в пределах до 1 мг/дм³ не приводят к заметному снижению обменной способности: функциональные группы катионита сохраняли активность, а удаление ионов кальция оставалось эффективным. Полученные результаты подтверждают, что влияние реагента определяется его структурой и концентрацией [2].

Таким образом, взаимодействие аминов с ионообменными смолами представляет собой комплексный процесс, зависящий от условий контакта. Учёт подобных условий позволяет поддерживать стабильность водно-химического режима энергоблоков ВВЭР.

Литература

1. **Тяпков Ш.Ф., Харитонов Н.Л.** Применение плёнообразующих аминов // Теплоэнергетика. 2022.
2. **Гусева О.В., Бутакова М.В., Прорехин С.М., Орлов К.А.** Изучение влияния нейтрализующих аминов на рабочую обменную ёмкость катионита КУ-2-8ЧС в схемах конденсатоочистки // Энергосбережение и водоподготовка, № 1, 2020. — С. 4–8.

Н.Н. Ноев, студ.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ В ОБОРОТНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС

В данной работе рассматриваются способы оценки эффективности работы ингибиторов коррозии применительно к оборотным системам тепловых электрических станций. Объектами исследования являются различные реагенты, применяемые в оборотных системах для снижения коррозионных процессов. Главной целью работы является определение эффективности ингибиторов коррозии при заданных показателях качества оборотной воды.

Значимостью проведенного исследования является возможность снижения скорости коррозии теплоэнергетического оборудования и продление его срока службы. Снижение скорости коррозии ведет к стабильной работе системы и улучшению показателей экономичности станции.

Повышение стоимости использования природных источников водоснабжения ведет к снижению величины продувки в оборотных системах энергетических объектов. Данное обстоятельство приводит к накоплению примесей в охлаждающей воде, повышению скорости коррозии и количества отложений. Реагентная обработка воды оборотного цикла позволяет предотвратить образование отложений и снизить скорость коррозии [1, 2]. Важным этапом определения оптимальной программы обработки является расчет индексов качества воды, позволяющий определить склонность системы к поверхностной коррозии или к образованию отложений и, как следствие, к подшламовой коррозии [3].

Результатом исследования стал анализ индексов стабильности системы, рассчитанных по данным, полученным при использовании различных ингибиторов коррозии, на основании которых сделана оценка эффективности ингибиторов коррозии при заданных параметрах системы оборотного охлаждения.

Литература

1. **Балабан-Ирменин Ю.В.** Применение антинакипинов в энергетике низких параметров / Ю.В. Балабан-Ирменин, Г.Я. Рудакова, Л.М. Маркович. — М.: Новости тепло-снабжения, 2011.
2. **Репин Д.А.** Оптимизация водно-химических режимов систем охлаждения конденсаторов турбин // НИУ «МЭИ». — Москва, 2009.
3. **Козловский В.В.** Совершенствование водного режима систем оборотного охлаждения ТЭС на основе реагентов ВТИАМИН // ГОУВПО «ИГЭУ». — Иваново, 2021.

С.С. Костин, асп.; рук. Е.К. Долгов, к.х.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Для очистки поверхностных и сточных вод ТЭС и АЭС от взвешенных веществ распространено применение механических фильтров периодического действия. В этих аппаратах поток очищаемой воды движется сквозь поровые каналы зернистой загрузки, в которых осуществляется задержание взвесей. При достижении заданного перепада давления фильтр выводится во взрывающую промывку, во время которой фильтрация прекращается. При этом, начиная с конца 70-х годов прошлого века во всем мире стали получать распространение механические фильтры непрерывного действия (ФНД). В них осуществляется одновременный процесс фильтрации и отмывки фильтрующей загрузки [1].

Достоинство и основное технологическое отличие ФНД от фильтров периодического действия заключается в том, что качество фильтрата зависит не от длительности фильтроцикла, а только лишь от скорости фильтрования, которая лимитируется скоростью начала псевдооживления фильтрующей загрузки и скоростью отрыва частиц загрязнений от гранул фильтрующей загрузки.

В настоящей работе выполнено проектирование систем очистки воды от взвешенных веществ по технологии как периодической, так и непрерывной фильтрации. По результатам расчетов представлены сравнительные характеристики данных технологий. Данные результаты могут быть полезны при выборе технологии механической очистки при строительстве новых установок химводоочистки, либо при реконструкции существующих объектов.

Расчет системы фильтрации периодического действия выполнен по стандартной методике, широко представленной в отечественной учебной и справочной литературе, в т.ч. в учебных пособиях каф. ТОТ НИУ «МЭИ» [2]. Расчет системы фильтрации непрерывного действия выполнен по методике швейцарской компании Nordic Water [3].

Литература

1. **Рябчиков Б.Е.** Процессы и аппараты в современной водоподготовке 3-е изд. — М.: ДеЛи, 2023. — 403 с.
2. **Громов С.Л., Долгов Е.К., Орлов К.А., Очков В.Ф.** Водоподготовка в энергетике: учебник. — М.: Издательство МЭИ, 2021. — 576 с.
3. **DynaSand handbook®** by Nordic Water. — 99 p. [Эл. Ресурс] URL: <https://ru.scribd.com/document/932792158/Dynasand-Handbook> (дата обращения: 07.11.2025).

Д.А. Михальцов, студ.; рук. Ю.А. Геллер, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ И МЕТОДЫ ЕГО ДИАГНОСТИКИ

Ресурс подземных трубопроводов теплоснабжения значительно снижается из-за совместного воздействия эрозии (вызванной высокоскоростным потоком с абразивными частицами) и коррозии. Определенный вклад в снижении ресурса вносит внешняя коррозия, которая связана с агрессивными грунтовыми водами и повреждением изоляции, однако ее влияние не является существенным по сравнению с эрозионно-коррозионным синергетическим эффектом.

На основе математической модели Финна [1] и Гранта-Табакова [2], а также с учетом современных методов практической оценки эрозии, предложенных в работе Ока [3], выполнен расчёт скорости чисто эрозионного износа, который составил **0,07 мм/год**. Скорость внутренней коррозии оценена в **0,15 мм/год**, а внешней коррозии **0,002 мм/год**. Учет синергетического эффекта между этими процессами позволил определить суммарную скорость разрушения **2,237 мм/год**. В итоге, потеря металла за 12 лет может достигнуть **26,84 мм**, что указывает на высокий риск локальных повреждений.

Для оценки состояния и остаточного ресурса применяются методы неразрушающего контроля. Разработаны методики комплексной диагностики, включающие прогнозный расчет износа и оптимальный набор методов для своевременного выявления критических дефектов.

На основании проведённого исследования предложена методика комплексной оценки состояния трубопроводов тепловых сетей, которая включает в себя расчёт износа и набор методов диагностики для своевременного выявления критических дефектов и планирования ремонтных работ.

Литература

1. **Finnie I.** Erosion by solid particles // *Wear*. 1960. Vol. 3, Iss. 2. P. 87–103.
2. **Grant G., Tabakoff W.** Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles // *Journal of Aircraft*. 1975. Vol. 12, No. 5. P. 471–478.
3. **Oka Y.I., et al.** Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact // *Wear*. 2005. Vol. 259. P. 95–101.

Секция 49
СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
Operation schemes and regimes of thermal
power plants

Председатель секции: к.т.н., доцент Дудолин Алексей Анатольевич

Секретарь секции: к.т.н. Крашенинников Сергей Михайлович

Исмаил Али, асп.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПОРШНЕВЫХ ДВС И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Рост доли ветровой и солнечной генерации усиливает потребность в высокоманевренных мощностях, способных сглаживать колебания выработки электроэнергии и поддерживать устойчивость энергосистемы. Наиболее приспособленными технологиями в этих условиях являются поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и аэродинамические газовые турбины (АГТ), различающиеся по динамическим характеристикам и эффективности [1].

Маневренность таких установок определяется временем пуска, скоростью изменения нагрузки, минимальной стабильной мощностью и КПД при частичной загрузке. Согласно данным GT PRO® и технической информации Wärtsilä, ДВС обеспечивают высокую маневренность: выход на номинальную мощность достигается за 2–5 минут, скорость изменения нагрузки превышает 100%/мин, минимальная устойчивая нагрузка составляет около 10% от номинальной. Для АГТ эти показатели ниже: пуск занимает 5–8 минут, скорость изменения нагрузки составляет около 50%/мин, а минимальная экологическая нагрузка достигает 40–50% от номинальной.

При частичной загрузке указанные различия становятся особенно значимыми. ДВС сохраняют КПД на уровне 40–48%, тогда как КПД АГТ снижается до 30–36%. Кроме того, газовые турбины также более чувствительны к температуре наружного воздуха: при +45°C снижение мощности может достигать 25%, тогда как у ДВС оно не превышает 2%. Модульная структура ДВС позволяет эффективно регулировать мощность в широком диапазоне.

Топливная гибкость делает ДВС менее зависимыми от колебаний давления и перебоев в газоснабжении. В совокупности эти свойства подтверждают, что ДВС являются более перспективным вариантом для балансирующих мощностей в энергосистемах с высокой долей ВИЭ.

Литература

1. Ullah K., Tunio M.A., Ullah Z., Ejaz M.T., Anwar M.J., Ahsan M., Tandon R. Ancillary services from wind and solar energy in modern power grids: A comprehensive review and simulation study // Journal of Renewable and Sustainable Energy. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 032701.

Н. Герман, аспирант; И.А. Бураков, к.т.н. (МЭИ, Москва)

ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ БИОРЕАКТОРОВ

Переход к устойчивой биоэкономике требует от биореакторов стратегического развития: перехода от стандартизированной работы к гибкой роли, способной адаптироваться к изменчивости сырья и рыночных потребностей. Эта адаптация имеет решающее значение для экономической эффективности и устойчивости биотехнологических процессов.

Современные подходы отдают предпочтение системному видению, которое в итоге позволит внедрить биореакторы в схемы энергетических объектов. Моделирование переноса массы и энергии позволяет моделировать динамические взаимодействия между биологической, химической и физической фазами [1]. Комплексное управление несколькими биореакторами с помощью централизованной цифровой платформы представляет собой значительный шаг вперед по сравнению с традиционным индивидуальным управлением.

Существующие методы объединяют интеллектуальные датчики и цифровой двойник для оптимизации циклов ферментации, сокращения времени простоя на 20%. Данное решение повысит рентабельность биоперерабатывающих заводов и облегчает внедрение новых штаммов микробов или альтернативных субстратов с целью повышения эффективности эксплуатации всего энергокомплекса. Предполагается адаптация к новым путям синтеза, к примеру, производство биопластиков [2].

Будущее биореакторов заключается в их адаптивности. Прогнозирующее моделирование сделает их важнейшими звеньями в отрасли, основанной на биоресурсах, сочетающей экономические показатели и экологичность эксплуатации.

Литература

1. **Zhang, Y., & Müller, C. (2023).** Dynamic Modelling of Multi-Phase Bioreactors. *Bioresource Technology*.
2. **IRENA (2022).** Innovation Outlook: Advanced Biofuels and Biorefineries, p. 78.

Цзиньфа Го, асп.; рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГПУ КОМПАНИИ JICHAI (КНР)

Ряд фирм из КНР сегодня предлагают газопоршневые установки (ГПУ) для российской энергетики[1]. Одним из ведущих производителей ГПУ является фирма «Jichai», которая производит двигатели внутреннего сгорания. ГПУ «Jichai» работают на природном газе, попутном нефтяном газе, биогазе и др. Технические характеристики основных модулей ГПУ «Jichai» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики основных модулей ГПУ «Jichai»

	1100GF-T	2000GF10-T	4000GF-T
Номинальная мощность, кВт	1100	2000	4000
Электрическая эффективность	≥38%	≥40%	≥41%
Модуль двигателя	H16V190Z _{LT} -2	L20V190Z _{LT} -2	16V 26/32
Удельный расход газа, кДж/кВт·ч	≤9000	≤8600	≤8220
Удельный расход масла, г/кВт·ч	≤0,6	≤0,3	≤0,3

Основные ГПУ «Jichai» имеют следующие конструктивные особенности:

- **Двигатель:** четырёхтактный, V-образный, водяное охлаждение, турбонаддув с промежуточным охлаждением; сбалансированный коленвал обеспечивает 25 000 ч до капремонта.
- **Система газораспределения:** электронный многоточечный впрыск, «точное» регулирование Woodward 2301A, обеднённое горение ($\lambda \approx 1,6$) снижает $\text{NO}_x < 500 \text{ мг/м}^3$.
- **Генератор:** синхронный бесколлекторный, класс изоляции H, IP23-IP44, коэффициент мощности 0,8.
- **Шумозащита:** контейнер 20 футов, уровень звука $\leq 75 \text{ дБ(А)}$ на 1 м.
- **Система управление:** контроллер ComAp IC-NT, дистанционный GSM-модем, автозапуск при пропадании сети.

Преимущества ГПУ «Jichai»: номенклатура включает модели мощностью от 300 до 4200 кВт, созданные при участии AVL List GmbH; сегодня все узлы изготавливаются в КНР самостоятельно; АО «Интертехэлектро» и компания «Jichai» заключили соглашение о совместной деятельности по локализации ГПУ «Jichai» в России. Соглашение предусматривает трехэтапный переход от крупноузловой сборки энергоустановок к их частичному, а затем и полному производству.

Литература

1. Го Цзиньфа, Буров В.Д. Газопоршневые установки из КНР для малой энергетики, В материалах конференции «СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ» (XXIII Бенардосовские чтения), 29–31 мая 2025 г. Иваново, ИГЭУ, — С. 43–46.

*В.В. Тишков, асп., А.Р. Богдан, асп.;
рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КВОУ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ

Сегодня в России более 20% (по мощности) ТЭС эксплуатируют газотурбинные установки (ГТУ), которые в качестве рабочего тела используют воздух, забираемый из окружающей среды. На мощных энергетических ГТУ расход воздуха составляет несколько сотен килограммов в секунду, поэтому важное место на газотурбинных и парогазовых ТЭС занимают специальные меры по его подготовке. Для этих целей применяются специальные комплексные воздухоочистительные устройства (КВОУ), большое внимание уделяется также вопросам проектирования воздухозаборных трактов (ВЗТ) от места забора воздуха до входа в компрессор ГТУ [1].

На ВЗТ устанавливаются в основном следующие элементы: погодные козырьки, сетки для защиты от птиц и насекомых, антиобледенительная система (АОС), система охлаждения воздуха, система фильтрации воздуха, устройства по шумоглушению. Каждый элемент (система) выполняет свои функции и к ним в соответствии с их функциями предъявляются технические требования, на основании которых выполняется их проектирование.

Однако наличие различных элементов (систем) в составе КВОУ и ВЗТ влияет на величину аэродинамического сопротивления на участке от забора воздуха до входа в компрессор. Увеличение аэродинамического сопротивления ВЗТ и КВОУ приводит к снижению мощности ГТУ. Так по данным ПАО «Мосэнерго» увеличение аэродинамического сопротивления на 5 мбар приводит к снижению мощности ГТУ на 0,8% (или около 1 МВт) для ГТЭ-160 [2].

Таким образом актуальным является комплексный учет влияния характеристик отдельных элементов (систем) КВОУ и ВЗТ на показатели экономичности ГТУ. При этом в качестве технических ограничений при проектировании элементов КВОУ является обеспечение соответствующих технических требований.

Литература

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С., Осыка А.С., Газотурбинные энергетические установки: Издательский дом МЭИ, 2011. — 428 с.
2. Ю.А. Радин, С.Н. Ленёв — ПАО «Мосэнерго», Некоторые особенности эксплуатации ПГУ. Проблемы и перспективы., в журнале «Газотурбинные технологии» — январь-февраль 2024, 48 стр., ISSN 2311-2646.

*В.В. Тишков, асп.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф.,
В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В ВОЗДУХОЗАБОРНЫЙ ТРАКТ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ

Высокие показатели эффективности ГТУ и ПГУ (КПД свыше 60% в комбинированном цикле) делают их ключевым элементом современной энергетики [1]. Однако следует отметить, что штатная работа ГТУ связана со значительным шумовым воздействием на прилегающие территории, в том числе селитебные [2].

При эксплуатации ГТУ наибольший вклад в акустическую нагрузку на окружающую среду вносит всас компрессора. Шум, исходящий от воздухозаборного тракта (ВЗТ), имеет аэродинамическую природу. Он обусловлен изменяющимися аэродинамическими силами, возникающими при взаимодействии турбулентного потока воздуха с ротором и статором компрессора, а также явлениями неустойчивости воздушного потока. Совокупная звуковая мощность шума всасывания ГТУ зависит от массового расхода, наружного диаметра рабочего колеса первой ступени компрессора, напора и адиабатного КПД компрессора [2]. Энергия звуковых волн, проходящих через элементы ВЗТ и комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ), снижается до требуемых уровней звука. Согласно [3] диссипативный пластинчатый глушитель должен обеспечивать снижение шума до уровня звука 80 дБА на расстоянии в 1 м от плоскости ВЗТ.

Стандартным решением данной проблемы является установка в тракты диссипативных глушителей шума [2]. Несмотря на их эффективность в снижении шума, возникает проблема, связанная с дополнительным аэродинамическим сопротивлением, из-за чего падает мощность и КПД, тем самым ухудшаются технико-экономические показатели ГТУ. В данной работе исследовано влияние различных конструкций глушителей шума, устанавливаемых в ВЗТ на изменение ТЭП ГТУ.

Литература

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С., Осыка А.С., Газотурбинные энергетические установки: Издательский дом МЭИ, 2024. — 428 с.
2. Тупов В.Б. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательство МЭИ, 2012.
3. ГОСТ Р 55168-2012 Тракты воздухозаборные стационарных газотурбинных установок. Общие технические требования.

Д.А. Лымарев, асп.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доцент («НИУ «МЭИ»)

О ВЛИЯНИИ СНИЖЕНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЯМОТОЧНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭС

Одним из параметров, наиболее существенно влияющих на тепловую экономичность паротурбинной установки ТЭС, является вакуум в конденсаторе. В реальных условиях эксплуатации он может меняться в широких пределах (от 3 до 20 кПа) в зависимости от погодных условий и режима работы турбины, что влияет на эффективность и надёжность ТЭС.

Ранее на ТЭС широко использовались прямоточные системы технического водоснабжения, обеспечивающие высокий уровень вакуума в течение всего года. В настоящее время, в связи с растущим дефицитом водных ресурсов возрастает плата за забор воды. При этом, ТЭС с прямоточными системами сталкиваются с необходимостью сокращения расхода циркуляционной воды для снижения затрат на водопотребление. Это приводит к ухудшению вакуума по сравнению с расчётным, в результате чего для обеспечения заданного уровня выработки электроэнергии необходимо увеличение расхода пара в голову турбины и, соответственно, увеличение расхода топлива [1]. При этом, эффективность снижения расхода циркуляционной воды зависит от режима работы оборудования, температуры циркуляционной воды на входе, стоимости потребляемой воды и стоимости топлива. В данных условиях необходимо определять оптимальную долю сокращения расхода циркуляционной воды.

Ниже приведены результаты расчёта изменения эффективности от сокращения расхода циркуляционной воды и роста затрат на топливо для турбины К-300-240 при условиях: $N_{\Sigma}=300$ МВт, $t_{B1}=20^{\circ}\text{C}$, $\Pi_{\Gamma}=6500$ руб./т.у.т., $\Pi_{\text{ЦВ}}=600$ руб./тыс. м³.

Расход циркуляционной воды, т/ч	36000	32400	28800	25000
Расход пара в голову турбины, т/ч	972,6	976,3	980,2	984,6
Давление в конденсаторе, кПа	5,4	5,7	6,1	6,6
Снижение мощности из-за P_K , МВт	-5,3	-6,4	-7,6	-8,9
Расход условного топлива, т.у.т./ч:	92,8	93,1	93,4	93,8
Прирост затрат на топливо, тыс. руб.	0,0	2025,6	4205,1	6674,6
Снижение затрат на забор воды, тыс. руб.	0,0	-2160,0	-4320,0	-6600,0
Изменение маржинального дохода, тыс. руб.	0,0	134,4	114,9	-74,6

Полученные результаты показывают, что в приведённых выше условиях может быть целесообразно сокращение расхода охлаждающей воды на 10–20%.

Литература

1. **РД 34.30.713** Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ (для турбин до заводского № 1198) — АО «Фирма ОРГЭС» — Москва. — 1976.

А.И. Кремер, студ.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доцент («НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ТЭС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕАЭРАТОРОВ ВИХРЕВОГО ТИПА

Современные энергоблоки предъявляют всё более высокие требования к качеству питательной воды. Одним из ключевых аспектов является эффективная деаэрация — удаление растворённых газов (прежде всего кислорода и углекислого газа), вызывающих коррозию в котло-турбинном тракте. На ТЭС для удаления газов применяют паровые струйные и барботажные деаэраторы, которые встраивают в технологическую схему [1].

Для устойчивой работы деаэратора необходимо поддерживать на всех режимах работы постоянное давление. Это приводит к необходимости обеспечения запаса в отборе пара на деаэратор на 30–40% выше давления в деаэраторе при номинальном режиме работы. При глубоких изменении нагрузки паротурбинного оборудования давление отборного пара на деаэратор снижается и возникает необходимость перевода его на вышестоящие отборы или общестанционные магистрали. В результате на всех этапах работы деаэратора происходит дросселирование потока пара.

В данной работе предлагается использовать для деаэрации питательной воды деаэраторы вихревого типа [2]. В этом случае конденсат под напором подается тангенциально в деаэрационную колонку и закручивается внутри, равномерно распространяясь по стенкам. Действие центробежных сил на периферии выше, чем в середине вихря, поэтому в центре образуется область пониженного давления. Вращательное движение воды обеспечивает интенсивное перемешивание и вскипание той части вращающегося потока, которая ближе к оси вращения. В результате происходит сепарация парогазовой фазы за границу раздела фаз. Отвод парогазовой смеси из центральной части колонки деаэратора обеспечивает деаэрацию воды.

Особенностью данного деаэратора является отсутствие подачи пара в деаэратор. Давление разрежения обеспечивается за счет центробежных сил и отвода парогазовой смеси из центральной части колонки. При этом происходит снижение температуры деаэрированной воды на 4–5°C, по сравнению с температурой поступающего конденсата. Подогрев воды происходит в системе регенерации низкого давления. Преимущества таких деаэраторов заключается в использовании низкопотенциального тепла и отсутствие дросселирования пара.

Литература

1. **Н.Д. Рогалев, А.А. Дудолин, Е.Н. Олейникова** Тепловые электрические станции — М.: Издательство МЭИ, 2022. — 768 с.
2. **Зимин, Б.А.** Сможет ли Россия преодолеть техническое и технологическое отставание: записки изобретателя [Текст] / Зимин Б.А. — М.: Новости теплоснабжения, 2011. — 225 с.

М.А. Беляев, асп.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доцент («НИУ «МЭИ»)

ВАРИАНТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ С ВНЕДРЕНИЕМ ПРОМПЕРЕГРЕВА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЭЦ

Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии является наиболее экономичным способом получения энергии в теплоэнергетике. В настоящее время Российская теплоэнергетика столкнулась с проблемой физического и морального старения генерирующего оборудования, особенно это касается ТЭЦ, наработка которых составляет 40–50 лет. Для решения этой проблемы Правительством РФ предусмотрена программа модернизации КОММОД [1].

Одним из способов модернизации агрегатов действующих ТЭЦ, которая при минимальных затратах позволила бы повысить их конкурентоспособность, является внедрение промежуточного перегрева пара. Реконструкция предусматривает модернизацию, как турбин, так и котлов. Основной целью данной работы является отработка вариантов реконструкции котлов.

Проведенный анализ конструкций барабанных котлов с естественной циркуляцией показал, что внедрение промперегрева сопряжено с необходимостью решения двух ключевых задач:

- размещение поверхностей нагрева промежуточного перегревателя в существующей компоновке котла без кардинального изменения его габаритов и без необходимости перестройки фундаментов и газоходов;
- обеспечение паропроизводительности на уровне 400–420 т/ч для модернизируемых турбин типа Т-110-130 при сохранении ими электрической нагрузки.

На основе анализа сформированы и предложены для дальнейшего исследования три основных технологических варианта реконструкции:

- Вариант 1: Надстройка конвективной шахты.
- Вариант 2: Интеграция радиационного перегревателя в топочную камеру.
- Вариант 3: Комбинированная схема. Сочетание конвективных и радиационных элементов, дополненное оптимизацией тепловых потоков с использованием CFD-моделирования.

Предварительные расчеты показали, что вариант 3 обеспечивает максимальный прирост КПД (до 2,5%) и обеспечивает оптимальную производительность по острому пару и пару промперегрева без изменения габаритов и фундамента котла. При этом ожидается повышение экономичности блока в целом на 4,5–5%.

Литература

1. **Постановление Правительства РФ № 43 от 25.01.2019 «О проведении отборов проектов модернизации генерирующих объектов тепловых электростанций».**

В.М. Расулов, асп.; рук. А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭС АЗЕРБАЙДЖАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА УЗКИХ МЕСТ И ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Повышение эффективности тепловых электростанций Азербайджана — ключевая задача для устойчивого развития энергетики. Предлагается комплексный подход, включающий выявление узких мест, анализ ограничений традиционной модернизации и постановку задач для внедрения интеллектуальных систем управления и мониторинга.

Основные узкие места: неоптимальные режимы горения, снижение эффективности теплообменов, износ турбин и ограниченные возможности адаптивного регулирования. Традиционная модернизация (капремонт, замена агрегатов) часто недостаточна, тогда как интеллектуальные системы позволяют прогнозировать, оптимизировать и проводить предиктивное обслуживание, повышая эффективность и снижая потери. Разработка и внедрение программного комплекса, который в реальном времени рассчитывает оптимальное распределение нагрузки между работающими энергоблоками ТЭС с учетом их текущих характеристик, стоимости топлива и прогноза. Оптимизация режимов и контроль горения повышают эффективность на ~6,5% [1], а регенерация тепла уходящих газов увеличивает КПД ещё на 3–4% [2]. Комплексное применение этих технологий улучшает тепловой коэффициент и снижает экологическую нагрузку [3].

Такой подход обеспечивает снижение расхода топлива, рост КПД, сокращение выбросов CO_2 , продление ресурса оборудования и создаёт основу для цифровизации и умного управления ТЭС.

Литература

1. **Murshitha Shajahan M.S., Najumnissa Jamal D.** Improvement in efficiency of thermal power plant using optimization and robust controller (2022).
2. **Кошелев С.М.** Влияние режимов работы системы регенерации на эффективность работы энергоблоков КЭС и ТЭЦ — ГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (2005).
3. **Коваленко П.Ю.** Комплексная оценка повышения эффективности энергоблоков ТЭС путем утилизации теплоты уходящих газов в системах регенерации турбин — Новосибирский государственный технический университет (2004).

*В.Д. Уланов, студ., О.В. Некрасов, асп.;
рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ МЭИ)*

ТЕПЛОФИКАЦИОННАЯ ТУРБИНА Т-259/307-23,5 ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ ТЭЦ ПАО «МОСЭНЕРГО»

Для компенсации энергодефицита в Московском регионе реализуется техническое перевооружение энергоблоков на базе турбины Т-250/300-23,5 столичных ТЭЦ-25 и ТЭЦ-23 в структуре ПАО «Мосэнерго». Для осуществления модернизации Уральским турбинным заводом была разработана и поставлена теплофикационная турбина Т-259/307-23,5, для установки в старых ячейках на 2 энергоблоках ТЭЦ-25 и одного энергоблока ТЭЦ-23 [1].

Новая турбина Т-259/307-23,5 аналогична по компоновке и тепловой схеме своей предшественнице. Проточная часть турбины также не претерпела изменений, а увеличение электрической мощности на 9 МВт достигается за счет увеличения расхода пара в голову турбины с изначальных 955 т/ч в номинальном режиме до 968 т/ч. Отпуск тепловой энергии был увеличен с 330 Гкал/ч до 345 Гкал/ч, при этом был снижен нижний предел регулирования давления в верхнем отопительном отборе при двухступенчатом подогреве сетевой воды с 0,06 МПа до 0,044 МПа и в нижнем отопительном отборе с 0,05 МПа до 0,034 МПа при работе с одноступенчатой схемой [1, 2].

Из основных конструкторских отличий можно отметить применение сотовых концевых уплотнений ЦВД; внедрение системы заградительного охлаждения лопаток последних ступеней; переход на новую электрогидравлическую систему регулирования [2].

Литература

1. **Буров В.Д., Уланов В.Д., Некрасов О.В.**, Пути модернизации турбины Т-250/300-23,5. Материалы межд. науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 11 том «Теплотехника», Тридцать первая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2025. — 1244 с., с. 976.
2. **Уланов В.Д., О.В. Некрасов, Буров В.Д.** Семейство теплофикационных турбин Т-250/300-23,5. Материалы межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии», 2 том «Теплотехника», Иваново, 2025, с. 37–40.

Г.К. Левада, асп.; рук. А.А. Дудолин, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБ В ПОДОГРЕВАТЕЛЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ Т-100-130

Повышение энергоэффективности действующих тепловых электростанций (ТЭС) является стратегической задачей. Одним из наиболее реализуемых путей модернизации без масштабной реконструкции является оптимизация теплообменного оборудования, в частности подогревателей высокого давления (ПВД) регенеративного тракта.

Традиционные круглые трубки ПВД создают значительные зоны отрыва потока, что приводит к высоким гидравлическим потерям и ограничивает теплообмен [1]. Внедрение обтекаемых профилей, таких как каплевидные трубки, позволяет интенсифицировать процессы теплопередачи и снизить сопротивление, что непосредственно повышает КПД энергоблока.

Выполнив разработку трёхмерных параметрических моделей трубных пучков (круглый и каплевидный профиль) в CAD-системе, сделав сравнительный анализ полей скорости, температур и локальных коэффициентов теплоотдачи, и производя расчёт интегральных показателей таких как число Нуссельта (Nu) и коэффициент гидравлического сопротивления (ξ) можно доказать, что применение каплевидных трубок принесет экономическую выгоду предприятиям [2, 3].

Замена трубного пучка в теплообменниках ПВД энергоблока с ПТУ Т-100-130, может обеспечить снижение расхода пара из отбора до 15%, что эквивалентно приросту электрической мощности турбины на 1.5–2.0 МВт и повышению КПД энергоблока на 0.7–1.0%. Полученные данные служат научным обоснованием для проектирования модернизированных теплообменных аппаратов и могут быть использованы в программах повышения эффективности ТЭС[4].

Литература

1. **Zukauskas A.** Heat Transfer in Crossflow Tube Banks // Hemisphere Publishing (1990).
2. **Гнатюк В.И.** Поперечное обтекание трубных пучков. — Киев: Техника (1989).
3. **Самсонов К.А.** CFD-исследование обтекания профилированных труб // Thermal Engineering (2020).
4. **Беляев М.И.** Подогреватели высокого давления на ТЭС // Энергоатомиздат (2013).

В.П. Мавроди, студ.; рук. С.М. Крашенинников, к.т.н.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГТУ-ТЭС С ВКЛЮЧЕННЫМ АОС

Особое внимание при строительстве ГТУ и, как следствие, ПГУ отводится температуре окружающей среды, т.к. от условий атмосферы имеется зависимость характеристик атмосферного воздуха, следовательно этот фактор влияет на затраты при сжатии в осевом компрессоре ГТУ и, в зависимости от системы регулирования топлива, может привести к возрастанию отпуска вырабатываемой мощности.

Из описания выше может возникнуть предположение, что малые температуры окружающего воздуха позволяют осуществить большую выработку электроэнергии, но это работает в рассмотрении только абсолютно сухого воздуха. В реальных условиях при отрицательных температурах и повышенной влажности возникает обледенение входного тракта КВОУ, защитной сетки и самих лопаток компрессора. Интенсивность обледенения также зависит от осадков в виде дождей, туманов и мокрого снега, что усредненно можно охарактеризовать степенью влажности атмосферного воздуха. Все эти последствия ведут к серьёзной опасности аварийного останова, помпажа, поломкам отдельных лопаток и, возможно, к выходу из строя всего лопаточного аппарата компрессора [1].

В исследуемой работе предлагается рассмотреть режим работы ГТУ-ТЭС до 24 МВт с возможностью подогрева всасываемого воздуха до $t_n = +5^\circ\text{C}$ благодаря установке трубного пучка после КВОУ, выполняющего роль воздухо-водяного теплообменника. Греющей средой выступает основной конденсат, отбираемый из газового подогревателя котла-утилизатора, расход которого регулируется по температуре всасываемого воздуха перед компрессором газовой турбины.

В итогах работы приводится диаграмма режимов ГТЭС «УРАЛ-6000» с использованием антиобледенительной системы, изменения параметров пароводяного контура и газозводушного тракта, влияние работы на общий КПД станции и удельные показатели.

Литература

1. **Киндл Ф.Х.** Эксплуатация газовых турбин в арктических условиях. ГФ, 1972, GSOA — 6 — 72.

Секция 50
КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ
И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ
Monitoring, automation, and control
in power engineering

Председатель секции: к.т.н., доцент Косой Анатолий Александрович

Секретарь секции: Фарафонов Георгий Викторович

М.Ю. Сеничкин, А.С. Фролов, студ.;
рук. А.А. Калашников, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АСУТП АЭС

Современные атомные станции нового поколения «3+» с повышенной мощностью до 1200 МВт [1] характеризуются высокой степенью автоматизации. Число измерительных каналов (ИК) на вновь проектируемых и строящихся энергоблоках АЭС достигает десятков тысяч единиц. В таких условиях применение традиционной покомпонентной поверки ИК требует крайне высоких трудозатрат. По разным оценкам для проведения однократной поверки 15 тыс. ИК требуется 37,5...42 тыс. человеко-часов [2]. Это затрудняет проведение обслуживания ИК, увеличивает длительности планово-предупредительных ремонтов АСУТП.

В сложившейся ситуации становится необходимым внедрение инновационных систем автоматизированной поверки (автоповерки), способных значительно снизить трудоёмкость обслуживания ИК и повысить его оперативность.

Для испытаний возможностей систем автоматизированной поверки разработан испытательный стенд [3].

Созданное ПО позволило обеспечить полный контроль и управление процедурами поверки: отображает текущее состояние каналов, фиксирует результаты измерений в режиме реального времени, а также позволяет вести архив и формировать отчётную документацию по каждому ИК. Внедрение подобного интерфейса является ключевым этапом обеспечения надёжности и удобства выполнения метрологического обслуживания.

Разработанное ПО предполагается использовать в качестве референтного решения при проведении последующих предпроектных полигонных испытаний систем автоповерки ИК АСУТП АЭС.

Литература

1. Горбаев В.А., Калинушкин А.Е. Семченков Ю.М., Коган И.Р., Аркадов Г.В., Боженов О.Л., Коноплев Н.П. Современные подходы к созданию АСУТП ВВЭР нового поколения // Атомная энергия. 2010. т. 109. Вып. 5. С. 267–271.
2. Калашников А.А. Автоматизированная поверка измерительных каналов на основе цифровых технологий // Автоматизация в промышленности. 2023. № 4. С. 12–16.
3. Сеничкин М.Ю., Фролов А.С., Калашников А.А. Разработка по для испытательного стенда инновационных систем автоповерки измерительных каналов АСУТП АЭС // Автоматизация в промышленности. — 2025. — № 7. — С. 42–44.

*И.М. Гранин, Г.М. Кухмистров, В.В. Поздеев, студ.;
рук. Г.В. Фарафонов, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)*

ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ПР225 НА OWENLOGIC

ПР225 — это современное программируемое реле (ПР), предназначенное для малых локальных систем, выпущенное в начале 2025 года российской компанией OWEN. Данное ПР широко используется в разных отраслях промышленности. Оно изготовлено в щитовом корпусе специально для установки в стенку щита, а благодаря его большой лицевой панели отсутствует необходимость использования дополнительной подключаемой панели оператора. В этом плане данный прибор имеет мало аналогов среди отечественных конкурентов. На данный момент у прибора 2 модификации, но ещё несколько находятся в разработке. Среди них бюджетная версия только с дискретными сигналами для простых проектов и версия для поддержки низкоомных датчиков, как на ТРМ. Прибор относится к второму поколению ПР. У него есть порт Ethernet, поддерживается протокол ModbusTCP/IP и, как следствие, вывод в облачное хранилище без дополнительных шлюзов. Также особенностью этого ПР является невозможность подключить модули расширения из-за особенностей форм-фактора, но можно подключать модули ввода/вывода Mx110 и Mx210 [1].

ПР225 программируется в отечественной среде OwenLogic. Одним из главных преимуществ данной среды является её доступность — это бесплатное российское программное обеспечение, имеющее большой выбор компонентов и функциональных блоков. Среда OwenLogic также достаточно проста в освоении. Программирование в данной среде можно осуществлять на языке функциональных блоков FBD и на текстовом языке ST [2].

Авторами работы был сделан обзор ПР225, и проанализированы достоинства, возможности и перспективы применения данного прибора.

Литература

1. ПР225 программируемое реле в щитовом исполнении с графическим дисплеем и Ethernet [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://owen.ru/product/pr225> (дата обращения: 06.10.2025).
2. Среда программирования Owen Logic [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://owen.ru/product/sreda_programmirovaniya_owen_logic (дата обращения: 06.10.2025).

М.А. Громов, студ.; рук. С.В. Гужов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

О ВОЗМОЖНОСТЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ОФИСНОГО ЗДАНИЯ

Автоматизация вентиляционных приточно-вытяжных установок (ПВУ) может осуществляться двумя основными способами: с использованием электромеханических реле (ЭМР) и с применением программируемых логических контроллеров (PLC) [1]. Преимущество ЭМР заключается в низкой стоимости и простоте реализации базовых алгоритмов управления. Ограничения: реализация сложных многоступенчатых алгоритмов становится затруднительной, поскольку каждая новая логика требует добавления новых элементов в схему, усложняет конструкцию, снижает надежность [2]. PLC — современное решение, позволяющее реализовывать сложные алгоритмы управления, обеспечивает гибкость и адаптивность системы, позволяя вносить изменения без необходимости изменений физической структуры сети. Ограничения: требуются специалисты с соответствующим уровнем подготовки; контроллер и программное обеспечение стоят дороже стандартных релейных устройств. В целях минимизации затрат, современные АСУ приточно-вытяжных вентиляционных установок (ПВУ) предлагается выполнять предпочтительно на ЭМР. Выполнен анализ схем АСУ ПВУ на ЭМР и с применением PLC, выбрана типовая схема на ЭМР в целях унификации, повышения надёжности и удешевления. Предлагается работать далее со схемами АСУ ПВУ на ЭМР.

Литература

1. **Савенков, Д.Н.** Современные программируемые контроллеры, применяемые при автоматизации технологических процессов : Учебное пособие / Д.Н. Савенков. — Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2024. — 74 с. — ISBN 978-5-7890-2208-5. — EDN FYYGRV.
2. **Гаврилова, О.А.** Методологические основы проектирования в условиях автоматизации систем технической подготовки производства / О.А. Гаврилова. — Москва : Издательство «Знание-М», 2024. — 116 с. — ISBN 978-5-00255-019-7. — DOI 10.38006/00255-019-7.2024.1.116. — EDN EPXAPK.

*А.А. Орлов, к.т.н., доцент; В.М. Щербаков, асп.;
Е.В. Крылова, к.п.н., доцент; А.А. Сириченко, к.т.н., доцент;
рук. А.А. Орлов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Газотурбинные двигатели большой мощности являются ключевым элементом энергетической инфраструктуры, от надежности которых зависит стабильность энергоснабжения. В условиях импортозамещения и роста требований к эффективности возрастает значение интеллектуальных систем диагностики [1], обеспечивающих раннее выявление неисправностей и прогнозирование ресурса.

Интеллектуальная автоматизированная система основана на комплексном анализе критических параметров [2]: температуры газов за турбиной, давления в компрессоре, вибрации ротора и расхода топлива. Методы статистического анализа и алгоритмы диагностического прогнозирования [3] позволяют выявлять скрытые отклонения и формировать прогноз состояния в реальном времени.

Алгоритмизация системы интегрирует модули сбора данных, диагностического анализа и прогностического моделирования в единый контур управления. Такой подход позволяет перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, снижая аварийные риски, продлевая ресурс оборудования и уменьшая затраты.

Литература

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Будадин О.Н., Калашников Е.А. Интеллектуальная система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата // Электротехническая статья 2024 — Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. — С. 40.
2. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Кенжалыев А.М., Авдеев А.Д. Цифровизация элементов объектов энергетической отрасли на примере лопатки газотурбинного двигателя // Инновационные перспективы Донбасса. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. — С. 154.
3. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2, 2025. — С. 211–221.

*А.А. Орлов, Е.В. Крылова, Д.Р. Графов, П.П. Зверев;
рук. А.А. Орлов, к.т.н., доц. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»)*

СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСТРОГО ПАРА БАРАБАННОГО КОТЛА БКЗ-210-140

Целью работы является синтез подсистемы автоматического регулирования температуры острого пара барабанного котла БКЗ-210-140. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: произведен тепловой расчет котла БКЗ-210-140; составлена схема теплотехнического контроля водопарового тракта котла; рассчитана подсистема автоматического регулирования температуры острого пара [1]; на основании ранее проведенных исследований [2–4] проведено программирование ПЛК 210 от компании ОВЕН в ПО Codesys 3.5, в том числе моделирование синтезированной подсистемы, которое показало устойчивость системы в заданных диапазонах параметров регулирования.

Литература

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ 2008. — 396 с., ил.
2. **Крылова Е.В., Орлов А.А. [и др.]**. Исследование каскадной подсистемы автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла ТГМ-96Б на ТЭЦ-21 // Тяжелое машиностроение. — 2023. — № 9. — С. 30–37. — EDN RSRABI.
3. **Орлов А.А., Крылова Е.В., В.М. Щербаков [и др.]**. Интеллектуальная Система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата // Электротехническая сталь 2024: Сборник материалов научно-технической конференции, Москва, 30–31 мая 2024 года. — Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. — С. 13–14. — EDN UACGKN.
4. **Орлов А.А., Крылова Е.В., Сириченко А.В. [и др.]** Применение отечественного микроконтроллера МИК-32 при автоматизации диагностического оборудования в теплоэнергетике // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината, Липецк, 06 декабря 2024 года. — Казань: Общество с ограниченной ответственностью «Бук», 2024. — С. 192–199. — EDN CVRHVD.

*И.А. Катохин, И.А. Казанцев студ.;
рук. С.В. Гужов, к.т.н. (НИУ МЭИ)*

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАССИВА ДЕШЕВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ДОРОГОСТОЯЩИХ АНАЛОГОВ

С развитием технологий «Интернет вещей» и «умной» инфраструктуры становится актуальной задача снижения стоимости систем измерений без потери точности. Использование одного дорогостоящего термометра сопротивления обеспечивает высокую точность, но ограничивает масштабируемость и требует значительных затрат на обслуживание. Более рациональным решением является применение массива недорогих сенсоров, данные которых обрабатываются совместно. Такой подход позволяет расширить охват измерений, повысить надёжность и детализировать распределение температуры по поверхности или объёму.

Точность системы обеспечивается не за счёт усложнения каждого отдельного датчика, а благодаря алгоритмической коррекции и статистической фильтрации, компенсирующим индивидуальные погрешности и шумы. В результате формируется интеллектуальная сеть измерений, способная обеспечивать точность, сравнимую с единичными дорогостоящими приборами, при значительно меньшей стоимости.

В качестве направлений развития рассматриваются технологии MEMS — для создания миниатюрных и энергоэффективных термосенсоров, обеспечивающие помехоустойчивую передачу данных и возможность измерений на больших расстояниях. Комплексное применение этих подходов позволит создать экономичную и масштабируемую систему температурного мониторинга нового поколения.

Литература

1. **Иванова Г.М.** Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по направлению «Теплоэнергетика», издательский дом МЭИ, 2007.
2. **Богданов А.Н.** Статистическая фильтрация случайных погрешностей измерений, 2024.

*А.А. Барбашин, Н.Г. Никитин, студенты;
рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТРЕНАЖЕРНОЙ МОДЕЛИ МОТОРНОГО РЕЖИМА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПГУ-450

Моторный режим турбогенератора — это специальный режим работы, при котором подача пара в турбину прекращается, но сам генератор остается подключенным к энергосистеме. В этом случае генератор переходит в режим двигателя, продолжая вращать ротор турбины с синхронной частотой [1].

Для энергоблока ПГУ-450 с паровой турбиной Т-125/150 использование моторного режима является важным инструментом оперативного управления. Однако ключевой проблемой является вентиляционный разогрев последних ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД) в условиях отсутствия пара. Этот эффект требует организации специального охлаждения паром для предотвращения повреждения лопаток [2].

Эффективным инструментом для моделирования таких процессов являются цифровые двойники. Они позволяют создавать виртуальные копии оборудования, что становится ключевым элементом для повышения безопасности и надежности. Например, тренажер, выступающий как упрощенный цифровой двойник турбины Т-150-7, позволяет безопасно моделировать критические нештатные режимы для обучения персонала и анализа рисков. Концепция тренажера была разработана профессором Э.К. Аракеляном. В настоящее время разработкой тренажера занимаются авторы.

В рамках этой задачи был разработан алгоритм на Python для расчета температурного распределения по ступеням турбины. Модель учитывает теплообмен с окружающей средой. Тестовые расчеты показали, что для поддержания безопасного температурного уровня необходим подвод охлаждающего пара на концевые уплотнения. В перспективе планируется интеграция графического интерфейса (GUI) на основе Tkinter для создания интерактивных сценариев тренировки оперативного персонала.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Старшинов В.А.** Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций // Москва, Издательство МЭИ, 1993.
2. **Аракелян, Э.К.** Исследование температурного состояния ступеней ЦВД паровой турбины Т-125/150 ПГУ-450 при работе в малопаровом режиме / Э.К. Аракелян, К.В. Сахаров // Новое в российской электроэнергетике. — 2013.

*Л.А. Королькова, студ.;
рук. С.В. Мезин, доц., к.т.н., зав. кафедрой АСУ ТП (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ В ПАРОСБОРНОМ КОЛЛЕКТОРЕ КОТЛА

Безопасная эксплуатация паровых котлов напрямую зависит от надежного срабатывания предохранительной арматуры. Повышение эксплуатационной надежности котельного оборудования за счет внедрения резервированной схемы управления предохранительными клапанами является актуальной темой в современных условиях

Классическая схема управления «2 из 2-х» предохранительными клапанами, хотя и обеспечивает определенный уровень защиты, имеет свои недостатки. Основным риском является возможность отказа одного из каналов, что может угрожать выполнению требований к суммарной пропускной способности и в конечном итоге привести к аварийным ситуациям, что подчеркивает необходимость поиска более надежных решений.

В настоящей работе осуществляется сравнительный анализ схем «2 из 2-х» и «2 из 3-х», на основе соответствия принципов обеспечения суммарной пропускной способности.

$$G_1 + G_2 + \dots + G_n \geq D_k, \quad (1)$$

где n — количество предохранительных клапанов, установленных на защищаемой системе; G_1, G_2, G_n — пропускная способность отдельных предохранительных клапанов, кг/ч; D_k — номинальная паропроизводительность котла, кг/ч; Q — номинальная теплопроизводительность водогрейного котла, Дж/кг (ккал/кг); y — теплота испарения, Дж/кг (ккал/кг) [1].

Результаты анализа показали, что использование схемы «2 из 3» для управления ИПУ является логичным и технически обоснованным развитием принципов, заложенных в методике расчета пропускной способности.

Литература

1. **Какузин В.Б.** Инструкция по организации эксплуатации, порядку и срокам проверки предохранительных устройств котлов Теплоэлектростанций. — М.: СПО ОРГРЭС, 1999.

Г.П. Павлов, студ.; рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕЛЯЦИОННЫЕ И КОЛОНОЧНЫЕ СУБД В ЭНЕРГЕТИКЕ

type	style	color	method
1	10	3421	32
2	4	543	43295
3	6	5235	82341

Рис. 1. Чтение данных в реляционных СУБД

type	style	color	method
1	10	3421	32
2	4	543	43295
3	6	5235	82341

Рис. 2. Чтение данных в колоночных СУБД

В современных системах управления, особенно в энергетике, выбор между реляционными и колоночными СУБД определяется конкретными задачами. Реляционные СУБД (PostgreSQL, Oracle) хранят данные по строкам и оптимальны для оперативных транзакций (OLTP), где важны целостность данных и частые обновления. Они успешно применяются в системах коммерческого

учета электроэнергии и SCADA/АСУ ТП для управления оборудованием в реальном времени.

Колоночные СУБД (ClickHouse, Cassandra) используют принципиально иной подход, храня данные по столбцам. Это делает их идеальными для аналитической обработки (OLAP) больших объемов информации. В энергетике они незаменимы для анализа телеметрии с датчиков, обработки данных с интеллектуальных счетчиков, прогнозирования нагрузок и хранения исторических показателей.

Ключевое различие: реляционные СУБД обеспечивают надежность оперативных транзакций, тогда как столбцовые ориентированы на высокоскоростной анализ больших данных. В современных АСУ ТП часто применяется комбинированный подход, где каждый тип СУБД решает свои специфические задачи в общей архитектуре системы управления.

Данное исследование направлено на создание практических рекомендаций и методики подбора СУБД под конкретные задачи АСУ ТП, учитывающей такие факторы, как требования к производительности оперативных транзакций, объемы аналитических данных, латентность обработки и масштабируемость системы.

Литература

1. **Бородин Г.А.** Программное создание баз данных: учебное пособие по курсу «Базы данных». Изд-во МЭИ, 2021.
2. **Градусов А.Б.** Базы данных: Введение в технологию баз данных: учеб.практ. пособие; Владим. гос. ун-т. им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. — Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021.

*А.М. Романова, Е.А. Никитин, Р. Кичатый, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ЗАШУМЛЕННЫМ ДАННЫМ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОБАСТНОСТЬ РЕГУЛЯТОРА

Эффективная работа систем автоматического регулирования теплоэнергетических объектов невозможна без точной математической модели объекта управления. На практике параметры модели идентифицируются по экспериментальным данным, которые всегда содержат шум и могут изменяться в зависимости от режима работы. Целью данной работы является сравнительный анализ стратегий идентификации и оценка их влияния на робастность системы регулирования [1].

Были проведены виртуальные эксперименты по снятию переходных характеристик на трех различных нагрузках с добавлением в выходной сигнал:

- Белого шума (имитация случайных помех)
- Цветного шума (низкочастотные дрейфы)
- Квантования по уровню (погрешность АЦП)

Идентификация модели объекта проводилась методом наименьших квадратов. Далее были рассчитаны настройки ПИД-регулятора для двух стратегий [2].

Проведенное исследование подтвердило, что использование усредненных параметров модели, полученных в результате идентификации на нескольких режимах нагрузки, позволяет синтезировать более робастный регулятор. Данная стратегия обеспечивает стабильное качество управления при изменениях рабочей точки объекта, что является критически важным для реальных теплоэнергетических систем. В качестве дальнейшего развития работы планируется исследовать влияние различных методов фильтрации шума на точность идентификации.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*Е.А. Никитин, А.М. Романова, В.Р. Можаров, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДАВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Задача обеспечения качества функционирования систем автоматического регулирования в условиях случайных возмущений является одной из ключевых в теории управления. Эффективность подавления этих возмущений определяется динамическими характеристиками как объекта управления, так и регулятора. Цель работы — установление количественных зависимостей между постоянной времени объекта, временем интегрирования ПИ-регулятора и способностью системы противостоять низкочастотным случайным возмущениям [1].

Исследование проводилось на модели типового динамического объекта, представленного апериодическим звеном 1-го порядка с передаточной функцией $W(s) = K/(Ts+1)$. В качестве тестового воздействия использовался низкочастотный случайный сигнал. Были проведены серии экспериментов, в которых варьировались:

- Постоянная времени объекта T в диапазоне от 10 до 100 с
- Время интегрирования ПИ-регулятора в диапазоне от $0.5T$ до $5T$

Для каждой комбинации параметров вычислялся интегральный показатель качества. Всего было проведено 45 экспериментов для построения поверхности отклика системы [2].

Установлены количественные зависимости между параметрами системы и эффективностью подавления случайных возмущений. Показано, что для эффективного подавления низкочастотных возмущений время интегрирования ПИ-регулятора должно находиться в диапазоне 1.2–1.8 от постоянной времени объекта. Полученные результаты позволяют формализовать процесс настройки регуляторов для работы в условиях случайных изменений нагрузки и могут быть применены для широкого класса технологических объектов. Дальнейшие исследования планируется направить на анализ объектов с более сложной динамикой.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

М.Э. Эрджелеп, студ.;
 рук. В.М. Парчевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ АЭС С ВВЭР

От качества работы парогенераторов (ПГ) зависят как экономика АЭС (влажность пара перед турбиной влияет на ее КПД), так и на безопасность (при тяжелых авариях запас воды в ПГ используется для охлаждения активной зоны реактора). Влажность пара ω и объем воды V зависят от нагрузки ПГ d и уровня воды h . Нагрузка управляется энергосистемой (современные АЭС должны работать в маневренном режиме), поэтому единственным параметром для оптимизации режима работы ПГ является уровень воды. При повышении уровня повышается влажность пара, снижается КПД энергоблока. Но в то же время повышается безопасность. Оптимальное значение уровня достигается компромиссом между экономикой и безопасностью. На рис.1 представлена блок-схема работы математического обеспечения системы управления уровнями. Используются математические модели: двумерные сепарационные характеристики (ДСХ) ПГ и объема воды в них V . Целевая функция R (Result, руб/ч) представляет собой алгебраическую сумму потерь от влажности пара L (loss) и «антипотерь» P (profit), отражающих безопасность. Входом системы являются нагрузки парогенераторов, выходами — оптимальные значения уровней, используемые как задания регуляторам уровня.

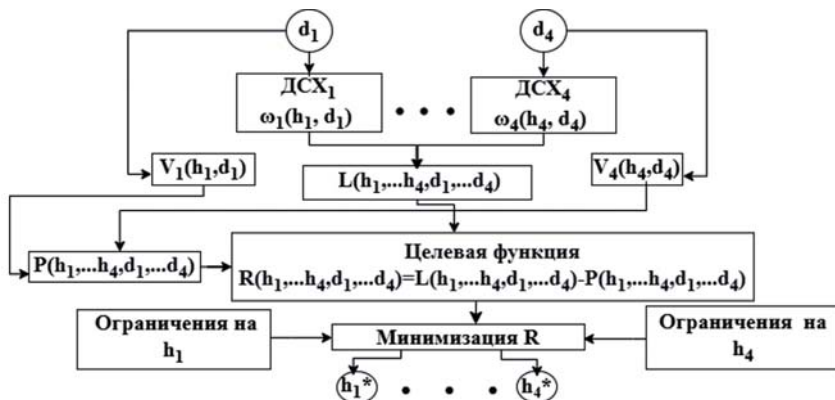


Рис. 1. Схема работы математического обеспечения системы управления уровнями в парогенераторах

Литература

1. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплотехнические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 316 с.
2. Парчевский В.М. Об оптимальном уровне воды в парогенераторе АЭС с ВВЭР. 11-я межд. н.т. конф. (МНТК-2018). Сб. трудов. С. 49–52. — М.: Росэнергоатом, 2018.

А.В. Самолыго, студ.; рук. В.В. Охотин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА К БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1200. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Технологический регламент энергоблока с реактором ВВЭР-1200 представляет собой основной эксплуатационный документ, устанавливающий жесткие требования к параметрам, режимам, пределам и условиям безопасной эксплуатации, действиям персонала. Его положения охватывают весь жизненный цикл работы энергоблока, включая нормальную эксплуатацию, аварийные ситуации, мероприятия по организации эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования. В связи с высокой сложностью и объемом регламентируемой информации, а также постоянными актуализациями документации, возникает важная задача по обеспечению высокого уровня знаний персонала.

Для минимизации рисков и гарантированного соответствия квалификации персонала предъявляемым требованиям необходима разработка и внедрение специализированной системы автоматизированного контроля знаний требований к безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1200, что являлось целью настоящей работы.

Анализ требований технологического регламента энергоблока №1 ЛАЭС-2 [1–2] позволил подготовить ряд вопросов для проведения автоматизированного контроля знаний.

Программная реализация системы автоматизированного контроля знаний выполнена на языке программирования Python. С помощью фреймворка Flask был создан пользовательский интерфейс, а для управления доступом пользователей и защиты данных использовалась библиотека Flask-Login.

Литература

1. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2. Организация эксплуатации, п. 8., — Утв. заместителем директора по производству и эксплуатации ЛАЭС-2 А.Г. Жуковым 28.03.2016 с изм. — с. 272–285.
2. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2. Эксплуатационные режимы, пределы и условия безопасной эксплуатации, п. 2., 3.1.2. — Утв. заместителем директора по производству и эксплуатации ЛАЭС-2 А.Г. Жуковым 28.03.2016 с изм. — с. 20–28, 31–33.

В.Ю. Стрелков, асп.;
рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭС С ВВЭР-1000 ПРИ ПЕРЕВОДЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА СКОЛЬЗЯЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ С ПЕРЕГРЕВОМ СВЕЖЕГО ПАРА

Известны преимущества перехода на скользящее регулирование давления свежего пара при работе паровой турбины на пониженных нагрузках как при дроссельном, так при клапанном регулировании подачи пара в турбину. Применение скользящего регулирования на атомных турбинах связано с уменьшением температуры насыщения свежего пара, как следствие понижения его давления при переходе на скользящее регулирование с соответствующими последствиями [1].

Для устранения этого недостатка предлагается при работе энергоблока на пониженных нагрузках перегреть свежий пар на выходе из парогенератора путем установки водо-парового перегревателя с использованием освободившегося тепла реактора при его разгрузке. Для этого часть циркуляционной воды первого контура необходимо направить на вход в теплообменник, перегреть свежий насыщенный пар затем сбросить охлажденную до ее температуры на выходе из парогенератора, смешать оба потока до ГЦН-а.

Образцом для исследований является АЭС с ВВЭР-1000 с турбоагрегатом К-1000-60/1500. Используя стандартные методы расчета схем, было подготовлено несколько наборов данных для уровня нагрузки 0,7–1,0 как для режима с перегревом пара, так и без него.

Результаты показали большой потенциал, так как электрический КПД увеличился в среднем на 0,5%, значения электрической мощности увеличились в среднем на 100 МВт. Кроме того, увеличение степени сухости в среднем на 2% обеспечивает потенциальную выгоду для надежности и срока службы турбинного оборудования.

Однако, этой работы еще недостаточно для практической реализации, так как необходимо провести дополнительные геометрические расчеты конструкции, чтобы проверить совместимость с существующими конструктивными решениями

Личный вклад автора заключается в расчетах тепловых схем и сравнительном анализе вариантов снижения негативных последствий при переходе на скользящее регулирование турбины на АЭС.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Стрелков В.Ю.** Особенности управления режимами работы паровой турбины реактора типа ВВЭР-1000 при скользящем регулировании давления пара // Новое в российской электроэнергетике. — 2025. — С. 32–40.

*А.Н. Федосов, В.Р. Можаров, И.С. Разумова, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С АДАПТИВНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

В системах автоматизации технологических процессов ТЭС существует проблема преждевременного износа мощных исполнительных механизмов при частых переключениях. Цель работы — разработка алгоритма распределения управляющих воздействий между параллельными исполнительными механизмами, основанного на величине отклонения регулируемого параметра [1].

Исследование проводилось на модели объекта регулирования с двумя параллельными исполнительными механизмами. Основным механизм большой мощности подключался при превышении порогового значения отклонения, тогда как корректирующий механизм малой мощности работал в зоне малых отклонений. Алгоритм переключения реализовывал гистерезис для предотвращения автоколебаний.

Результаты моделирования показали эффективность предложенного подхода. Основным исполнительный механизм активировался только 12–15% времени работы системы, что позволило снизить количество его переключений с 850 до 120 в сутки. При этом точность поддержания технологического параметра в рабочем диапазоне улучшилась на 25% благодаря использованию специализированного механизма для точного регулирования [2]. Разработанная система с адаптивным распределением управляющих воздействий между параллельными исполнительными механизмами доказала свою эффективность для ресурсосберегающего автоматического регулирования. Установлено, что пороговое переключение между механизмами в зависимости от величины рассогласования позволяет оптимально распределить функции между оборудованием различной мощности.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

Д.Е. Шванский, студент; рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В АСУТП ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПТК «ИНКОНТ»

В свете ограничений на поставки зарубежного оборудования создание отечественных программно-технических комплексов (ПТК) для АСУТП стало особенно актуальным для российской энергетики. Это требует формирования полного цикла проектирования и эксплуатации на базе российских решений. Одним из таких продуктов является ПТК «ИНКОНТ», разработанный компанией «ИНКОНТРОЛ». Комплекс реализует классическую трёхуровневую архитектуру и обеспечивает полный функционал по мониторингу, управлению и диагностике оборудования. Ключевыми преимуществами системы являются её кросс-платформенность, наличие библиотеки программных прототипов и возможность онлайн-модификации алгоритмов без остановки технологического процесса, что автоматизирует рутинные операции проектирования.[1] Практическая апробация комплекса была успешно проведена на энергоблоке №4 Ириклинской ГРЭС, где произведена полная замена импортных систем Siemens Simatic. Алгоритмы были спроектированы в среде MasterSCADA 4D с использованием библиотеки IC.LIB, что позволило сохранить точность регулирования. Результаты внедрения подтвердили, что ПТК «ИНКОНТ» обеспечивает надежность и функциональность, сопоставимые с зарубежными аналогами. Использование отечественного комплекса позволило снизить затраты на лицензирование, обеспечить соответствие требованиям информационной безопасности и повысить технологическую независимость предприятий.

Литература

1. **Рахманов Э.Р., Рогачев Р.Л., Кононов А.Г., Мухаррямов Р.В.** Разработка и внедрение головного образца российского программно-технического комплекса САУ ГТУ и АСУ ТП энергоблока № 2 Сочинской ТЭС // Газотурбинные технологии. — 2023. — № 2(191). — С. 2–8. — EDN SUJAQH.

*М.М. Исламов, М.А. Кирнус, И.С. Разумова, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ

Задача быстрой и точной настройки ПИД-регуляторов остается актуальной для теплоэнергетических объектов. Широко используемый метод Циглера-Николса (Ц-Н) не требует априорного знания модели объекта, но часто дает неоптимальные настройки. Аналитические методы, напротив, требуют точной модели объекта [1]. Цель работы — разработка комбинированного метода, лишенного недостатков исходных подходов, и оценка его эффективности.

Исследование проводилось на модели теплообменника, представленной аперийным звеном 2-го порядка с запаздыванием [2]. Сравнивались три стратегии настройки ПИД-регулятора:

1. **Чистый Ц-Н:** Классический экспериментальный метод.
2. **Чистая аналитика:** Настройка по расчетным параметрам модели, идентифицированной по переходной характеристике.
3. **Комбинированный метод:**
 - Проведение эксперимента по методу Ц-Н для определения критического коэффициента усиления ($K_{кр}$) и критического периода колебаний ($T_{кр}$).
 - Аналитическая идентификация параметров модели объекта (K , T , τ) по полученным $K_{кр}$ и $T_{кр}$.
 - Расчет окончательных настроек ПИД-регулятора по идентифицированной модели.

Качество работы каждой настройки оценивалось по переходным процессам и интегральным критериям.

Исследованный комбинированный метод настройки ПИД-регулятора показал свою эффективность, превзойдя по интегральным показателям качества как классический метод Циглера-Николса, так и чисто аналитический подход. Метод сохраняет достоинство Ц-Н — простоту экспериментального определения параметров, но позволяет получить более точные настройки за счет использования аналитического аппарата.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*М.А. Кирнус, Д.Д. Купцова, М.Н. Михалев, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СИНТЕЗ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С БЕЗУДАРНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТРЁХПОЗИЦИОННЫМ РЕЛЕЙНЫМ И ПИ-РЕГУЛЯТОРАМИ

В теплоэнергетических системах часто возникает задача эффективного управления при ограничениях на исполнительные механизмы. Трёхпозиционное релейное регулирование просто в реализации, но приводит к автоколебаниям. ПИ-регулятор обеспечивает высокую точность, но может иметь недостаточное быстродействие. Цель работы — синтез гибридной системы, объединяющей преимущества обоих подходов, с разработкой алгоритма безударного переключения для практической реализации. [1].

Разработан алгоритм гибридного управления, где:

- **Релейный регулятор** используется для быстрой отработки больших скачков задания.
- **ПИ-регулятор** включается вблизи уставки для точного поддержания температуры и подавления возмущений.

Ключевым элементом является алгоритм безударного переключения, при котором в момент перехода с реле на начальное состояние интегратора ПИ-регулятора рассчитывается таким образом, чтобы его выходной сигнал соответствовал текущему выходу релейного регулятора. [2].

Проведено сравнительное моделирование трёх конфигураций:

- Только релейное регулирование
- Только ПИ-регулирование
- Гибридная система с безударным переключением

Сочетание релейного регулирования для грубого управления и ПИ-регулятора для точной стабилизации позволяет достичь высоких показателей качества при минимальной стоимости реализации. Алгоритм безударного переключения обеспечивает плавность переходных процессов и может быть реализован на стандартных программируемых контроллерах.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*Д.Д. Купцова, М.М. Исламов, А.Н. Федосов, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАТОРА ВОЗМУЩЕНИЙ В КОНТУРЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА

Поддержание стабильной температуры пара является критически важной задачей в теплоэнергетике. Колебания расхода топлива, изменения параметров питательной воды и другие возмущения существенно ухудшают качество регулирования. Традиционные ПИД-регуляторы обладают ограниченной эффективностью против низкочастотных возмущений. Цель работы — исследование возможности улучшения качества регулирования путем введения в контур управления компенсатора измеряемых возмущений [1].

В качестве объекта управления рассматривался участок пароперегревателя. Основным возмущающим воздействием, влияющим на температуру пара, приняты колебания расхода топлива, которые являются измеряемым параметром. Данное возмущение эквивалентно по своему динамическому воздействию на объект изменению теплотворной способности топлива. Для исследования также рассматривался сценарий с косвенной оценкой теплотворной способности через модель теплового баланса, однако в представленных результатах используется прямое измерение расхода топлива как наиболее практичный метод.

Передаточная функция компенсатора рассчитывалась аналитически на основе известной модели объекта. Моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink с оценкой качества регулирования по квадратичному интегральному критерию [2].

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность компенсатора возмущений для задач регулирования температуры пара. Внедрение компенсатора позволяет существенно повысить качество регулирования и стабильность параметров пара при наличии низкочастотных возмущений. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации систем автоматизации теплоэнергетических объектов. Дальнейшие исследования планируется направить на разработку адаптивного компенсатора для работы в условиях нестационарных характеристик объекта.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*И.С. Разумова, М.П. Дадыка, Н.Д. Сгибнев, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОСТИ КОМПЕНСАТОРА СМИТА К ОШИБКЕ ОЦЕНКИ ПОСТОЯННОЙ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ОБЪЕКТА

Компенсатор Смита является эффективным методом для управления объектами с запаздыванием, однако его главным недостатком является чувствительность к точности математической модели объекта, особенно к постоянной запаздывания. Цель работы — количественный анализ робастности системы с компенсатором Смита к ошибке оценки постоянной запаздывания и определение допустимых границ этой ошибки [1].

Безразмерная ошибка оценки запаздывания вводилась как $\delta = (\tau_m - \tau_r) / \tau_r$. Были проведены серии экспериментов для различных значений δ в диапазоне от -0.5 (занижение на 50%) до +0.5 (завышение на 50%). Для каждого случая оценивались:

- Перерегулирование (σ , %)
- Время регулирования (t_p , с)
- Запас устойчивости по фазе
- Критическое значение δ_{crit} при котором система теряет устойчивость.

Установлено, что система с компенсатором Смита обладает существенно несимметричной робастностью к ошибкам оценки запаздывания. Завышение оценки запаздывания является критичным фактором, ограничивающим практическую применимость метода [2]. Для исследованного класса объектов допустимая ошибка не должна превышать +20%. Полученные результаты имеют важное практическое значение при проектировании систем с компенсатором Смита, указывая на необходимость точной идентификации запаздывания и осторожности при выборе его оцененного значения.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*М.П. Дадыка, И.С. Разумова, студ;
рук. А.А. Калашников, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

С появлением и развитием программно-технических комплексов стал наблюдаться стремительный рост количества измерительных каналов (ИК) АСУ ТП на вновь проектируемых и строящихся энергоблоках АЭС. В целях снижения трудозатрат на метрологическое обслуживание в АО «РАСУ» создаются системы автоматизированной поверки ИК.

Создание таких систем требует решения целого комплекса научно-промышленных задач в развитии измерительной и вычислительной техники. Одной из таких задач является создание человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего удобство выполнения автоматизированной поверки. В частности, необходимо обеспечить наглядность результатов поверки с ранжированием выявленных погрешностей и дефектов ИК.

В рамках работы были разработаны несколько вариантов интерфейсных решений, включая:

- сводную таблицу с ранжированием каналов по степени отклонения расчётных и фактических показаний;
- интерактивный даш-борд с возможностью детализации истории изменения каждого параметра.

В данной работе был проведён анализ выполнения метрологического обслуживания АЭС. На основе этого анализа были сформулированы требования к ЧМИ: наглядность, минимальное количество действий для получения нужных данных, однозначность результатов поверки с целью определения необходимости выполнения техобслуживания и ремонтов.

Разработанный интерфейс является ключевым элементом для внедрения системы автоматизированной поверки. ЧМИ обеспечит комфортную работу персонала метрологической службы за счёт интуитивно понятной визуализации состояния ИК.

Литература

1. **Ben-Gan I.** T-SQL Fundamentals. — Boston: Addison-Wesley, 2021. — 450 с.
2. **Калашников А.А.** Модульные системы и цифровые технологии автоматизированного метрологического обеспечения АСУТП атомных станций: дис. ... д-ра. техн. наук. — Москва, 2024. — 282 с.

*Д.Е. Шванский, студ.; А.А. Минькин, асп.;
рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
А.А. Шилов, глав. спец. АО «РАСУ»*

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТИПОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ АСУ ТП ЭНЕРГОБЛОКОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Опыт проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) для энергоблоков демонстрирует эффективность системного подхода, который обеспечивает целостность, надежность и безопасность объекта [1]. Данный подход реализуется через строго регламентированные этапы жизненного цикла, описанные в V-модели, начиная с предпроектного обследования и формирования требований верхнего уровня и заканчивая вводом в промышленную эксплуатацию [2]. Это позволяет комплексно учитывать все аспекты — от интеграции разнородных ПТК до соответствия строгим отраслевым стандартам и нормам, в особенности в части обеспечения принципов резервирования, разделения и независимости [3].

Ключевым элементом типовой архитектуры является четкое разделение на системы нормальной эксплуатации (ТПТС-НТ) и системы безопасности (ТПТС-СБ) [4], что обеспечивает отказоустойчивость и выполнение критических функций даже в аварийных режимах. Архитектура строится по модульному принципу, поддерживает резервирование, независимость и разнообразие в УСБ и гарантирует устойчивость к отказам по общей причине.

Применение системного подхода к проектированию типовой архитектуры АСУ ТП энергоблоков позволяет не только стандартизировать процессы создания и внедрения систем, но и значительно повысить их надежность, безопасность и ремонтпригодность. Это создает основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления, ориентированных на повышение эффективности и безопасности объектов генерации в долгосрочной перспективе.

Литература

1. **НП-001-15** «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций».
2. **ГОСТ Р МЭК 61513-2011** «Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования».
3. **НП-026-16** «Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций».
4. **Решения ТПТС для АСУ ТП АЭС** Заседание секции АСУ НТС №1 ГК «Росатом», ФГУП «ВНИИА», 30.10.2025.

*Н.Д. Сгибнев, М.В. Емелина, В.Н. Ляхов, студенты;
рук. А.А. Косой, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ РОБАСТНОСТИ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ К ВАРИАЦИЯМ СКОРОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

При модернизации систем автоматики часто производится замена исполнительных механизмов, что приводит к изменению динамических характеристик контура регулирования. Исполнительные механизмы постоянной скорости могут быть представлены интегрирующим звеном, постоянная времени которого обратно пропорциональна скорости [1]. Цель работы — анализ устойчивости (робастности) системы к вариациям параметров ИМ и разработка практических рекомендаций по корректировке настроек регулятора.

Исследование проводилось на модели системы, включающей в себя:

1. ПИ-регулятор.
2. Модель ИМ постоянной скорости (интегрирующее звено).
3. Объект управления (апериодическое звено 2-го порядка).

Была проведена серия экспериментов:

1. Настроен оптимальный ПИ-регулятор для системы с «базовой» скоростью ИМ
2. Скорость ИМ последовательно уменьшалась и увеличивалась в 2, 4, 6 раз.
3. Для каждой новой скорости производилась перенастройка регулятора с фиксацией новых оптимальных параметров регулятора.

Установлены количественные зависимости для перенастройки ПИ-регулятора при изменении скорости исполнительного механизма. Показано, что для сохранения качества регулирования при уменьшении скорости ИМ необходимо уменьшать коэффициент усиления и увеличивать время интегрирования регулятора [2]. Предложенные эмпирические соотношения позволяют быстро скорректировать настройки контура после замены оборудования, минуя трудоемкую процедуру полной перенастройки. Полученные результаты апробированы на математической модели и готовы к проверке на реальных объектах.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.

*Е.Д. Максимова, С.Р. Фильчагин, студенты;
рук. Н.С. Долбикова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

УЧЕТ СОСТОЯНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕМОНТОВ НА ТЭС

На тепловых электростанциях важно не допускать внезапных поломок оборудования. Один из лучших способов этого добиться — грамотно планировать ремонт, основываясь не только на состоянии основного оборудования, но и контрольно-измерительных приборов. Это значит, что нужно следить за поведением приборов во время всего процесса работы. Главным источником информации об этом служат результаты регулярных проверок, которые показывают, насколько точны показания датчиков давления, температуры или уровня [1]. Также важно анализировать рабочие журналы, где операторы отмечают любые странности в поведении датчиков, например, скачки показаний. Еще один полезный метод — сравнивать, как долго работают одинаковые датчики по всей станции. Это помогает предсказать, когда аналогичный прибор скорее всего выйдет из строя. Когда вся эта информация собирается в одну компьютерную систему, планирование становится гораздо эффективнее. Это позволяет избежать простоев всего энергоблока из-за одного неисправного датчика. Такой подход — от реактивного исправления поломок к проактивному их предупреждению — делает работу ТЭС более безопасной, надежной и экономически выгодной [2]. Система работает на опережение, предсказывая проблемы до их возникновения и превращая расходы на ремонт в управляемые инвестиции в надежность станции [3].

Литература

1. Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. и др. Под ред. Лавыгина В.М., Седлова А.С., Цанева С.В. Тепловые электрические станции. Учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. Грибков А.М. Системы диагностирования элементов ТЭС. Учебное пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017.
3. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. — М.: Изд во НЦ ЭНАС, 2006.

*Е.Р. Сташанин, А.А. Щербаков, И.С. Разумова, студенты;
рук. Н.С. Долбикова, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)*

АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В КОНТУРАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЭС

Точность и быстродействие систем автоматического регулирования энергоблоков ТЭС существенно ограничиваются динамическими погрешностями средств измерений. Термопреобразователи сопротивления и термодатчики в защитных гильзах вносят значительное фазовое запаздывание в контур регулирования, а наличие высокочастотных шумов требует применения фильтров, дополнительно увеличивающих запаздывание. Цель работы — разработка алгоритма обработки сигналов, позволяющего одновременно подавлять шумы и компенсировать динамическое запаздывание датчиков [1].

Исследование проводилось на математической модели контура регулирования температуры перегретого пара [2]. Разработанный алгоритм включает последовательную обработку сигнала через три основных блока. Первый блок реализует адаптивную полосовую фильтрацию для подавления высокочастотных шумов. Второй блок осуществляет динамическую коррекцию сигнала с использованием передаточной функции, обратной характеристике датчика. Третий блок выполняет обнаружение и подавление импульсных помех на основе анализа скорости изменения сигнала. Эффективность алгоритма оценивалась по фазовому запаздыванию в контуре управления и интегральным критериям качества регулирования. Проведенное моделирование показало значительное улучшение динамических характеристик системы регулирования. Особенно заметно улучшение качества регулирования при работе энергоблока на переменных нагрузках, где традиционные методы фильтрации показывают недостаточную эффективность.

Литература

1. **Иванова Г.М.** Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 460 с. — ISBN 5-7046-1046-3.
2. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.

*Л.Р. Галимзянова, студ., М.В. Макаров, студ.;
рук. Е.И. Мерзликина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА УЧАСТКА ТРЕНАЖЕРА АСР В СРЕДЕ SIMINTECH

Компьютерные тренажеры являются важным инструментом для обучения студентов и персонала предприятий и обеспечения понимания сложных динамических процессов в современной энергетике и других отраслях промышленности [1].

Существует множество программных сред, в которых можно разработать тренажеры. В данной работе рассматривается тренажер АСР (автоматической системы регулирования), поэтому выберем программный пакет SimInTech [2]. Широкий функционал этого пакета позволяет построить необходимые модели составляющих АСР и создать визуализацию. Разработанный тренажер представляет собой модель одноконтурной АСР, снабженную визуализацией.

Визуализация представляет собой фрагмент операторского интерфейса, позволяет изменять задание регулятору, наносить возмущение на объект, изменять параметры настройки регулятора, анализировать информацию о работе АСР.

Тренажер состоит из трех основных частей: математическая модель одноконтурной АСР; область задания параметров настройки регулятора и величин сигналов, поступающих на вход системы; область вывода сигналов на входе и выходе системы.

Модели объекта и регулятора созданы при помощи стандартных блоков библиотеки «Динамические» пакета SimInTech. Регулятор работает по ПИ-алгоритму.

Для задания параметров настройки регулятора были использованы геометрические примитивы «Стрелочный прибор» и «Линейный прибор».

Вывод данных осуществляется при помощи графических примитивов «Стрелочный прибор» и «График».

Расположение данных областей в одном окне позволяет обучающемуся в режиме реального времени анализировать различные ситуации, не отвлекаясь на лишние действия (например, переключение между окнами). Разработанный тренажер может быть использован при обучении настройке АСР.

Литература

1. **Магид, С.И.** Тренажерная подготовка персонала энергетике. История. Состояние. Нормы. — Москва : Энергобезопасность, 2017. — 158 с.
2. <https://simintech.ru/>, дата доступа 25.11.2025.

*М.В. Макаров, Л.Р. Галимзянова, И.С. Разумова, студенты;
рук. Н.С. Долбикова, ст.преп. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЭС НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО ДУБЛИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ

Обеспечение достоверности измерений температуры на энергоблоках ТЭС является критически важной задачей, от которой зависит как экономичность, так и безопасность эксплуатации. Существующие системы аппаратного резервирования повышают надежность, но не решают проблему постепенного дрейфа метрологических характеристик датчиков. Предлагаемый метод виртуального дублирования направлен на компенсацию этого недостатка за счет создания программных аналогов измерительных каналов [1].

В основе метода лежит создание виртуального датчика температуры на основе математической модели теплового процесса. Для измерения температуры пара на выходе пароперегревателя разработана модель, использующая измерения давления пара, расхода топлива и расхода питательной воды [2]. Аprobация метода на модели энергоблока показала его высокую эффективность для обнаружения метрологических отклонений. При имитации дрейфа характеристики термопары на 3–5% система виртуального дублирования обеспечила своевременное обнаружение отклонения с формированием корректирующего воздействия. Погрешность измерения температуры в переходных режимах работы энергоблока снижена на 20% по сравнению с использованием только физических датчиков. Особенно значительное улучшение точности наблюдается при работе оборудования на переменных нагрузках, где традиционные методы калибровки оказываются недостаточно эффективными.

Литература

1. **Иванова Г.М.** Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 460 с. — ISBN 5-7046-1046-3.
2. **Андрюшин А.В.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с.

*В.В. Кузовкова, студ.; А. Сыдыков, асп.;
Е.И. Мерзликина, к.т.н., доц. («НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСР С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПОИСКОВОГО МЕТОДА НАСТРОЙКИ

Цель этой работы — расчет АСР с применением беспойскового метода настройки ПД-регулятора. Для верификации найденных параметров настройки выполнено моделирование АСР во временной области в среде SimInTech [1]. Параметры настройки регулятора найдены с помощью метода, изложенного в [2]. Настройка параметров регулятора может быть выполнена несколькими методами, выбор их зависит от доступности экспериментальных данных и характеристик объекта управления, а также от ряда других особенностей решаемой задачи. При входном ступенчатом воздействии традиционными способами нахождения оптимальных параметров настройки регулятора являются методы, описанные в [3], переходный процесс при этом получается колебательным. Беспойсковый метод расчета позволяет найти параметры ПД-регулятора через МНК-приближение КЧХ регулятора к КЧХ оптимального регулятора, получив, в том числе, неколебательный переходный процесс. Возможности современных программных средств позволяют выполнить расчет с применением языка программирования, обеспечив в дальнейшем автоматизацию расчета коэффициентов регулятора.

Алгоритм определения оптимальных параметров настройки был разработан и реализован в среде разработки Jupyter Notebook, использующей язык Python. Также была произведена оценка качества полученных переходных процессов.

На рис. 1 дан фрагмент модели АСР с ПД-регулятором в SimInTech.

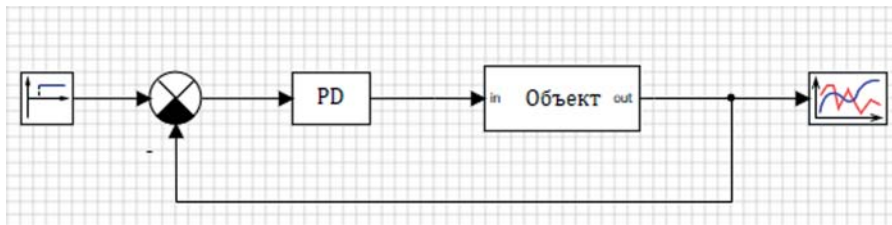


Рис. 1. АСР с ПД-регулятором

Литература

1. Официальный сайт SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 09.12.2025).
2. Пикина Г.А., Мещерякова Ю.С. Беспойсковый метод расчета настроек ПИД-регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика.2012. № 10. С. 58–64.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

П.Н. Лозбичева, асп.;
рук. Е.И. Мерзликина, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ ФИЛЬТРАМИ ТЭС: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

В данной статье рассматриваются существующие системы управления электростатическими фильтрами ТЭС и требования к таким системам, а также неисправности, возникающие при эксплуатации электростатических фильтров и связанных с ними систем управления.

На производительность электростатического фильтра оказывает влияние комплекс его рабочих параметров. При их неправильной настройке частота отказов возрастает. Однако определение причин и мест возникновения неисправностей затруднено, что снижает эффективность сбора пыли и уровень автоматизации управления.

В данной статье описываются 4 типа систем управления электростатическими фильтрами по их функциональному назначению и задачи, решаемые каждым из рассматриваемых типов систем управления [1].

Приводится классификация исполнений систем управления электростатическими фильтрами по их элементной базе, а также преимущества и недостатки указанных исполнений [1].

Рассматриваются неисправности, возникающие при эксплуатации электростатических фильтров в части работы системы встряхивания электродов электростатических фильтров, регулирования обогрева изоляторных коробок и бункеров, а также питания электростатических фильтров [2].

В статье указываются основные методы обнаружения неисправностей, рекомендуемые правилами эксплуатации электростатических фильтров [3].

Литература

1. **ГОСТ 28904-91.** Системы управления электрофильтром. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2006.
2. **Чутунков Д.В., Герасименко А.Е., Мерзликина Е.И., Лозбичева П.Н.** Повышение эффективности работы электрофильтров на ТЭС: проблемы, решения и перспективы. Новое в российской электроэнергетике. — 2024. — № 4. — С. 30–42.
3. **РД 34.27.504-91.** Типовая инструкция по эксплуатации электрофильтров. М.: Стандартинформ, 1991.

Секция 51
ТЕПЛОТЕХНИКА И МАЛАЯ
РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА
Heat engineering and small distributed
power engineering

Председатель секции: к.т.н. Мереуца Евгений Васильевич

Секретарь секции: Абрамова Дарья Александровна

М.С. Циркунов, студ.; рук. Ю.В. Шацких, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОИСКА АНОМАЛИЙ, КЛАССИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ, ПРЕДСКАЗАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В данной работе рассматриваются подходы к разработке и применению моделей машинного и глубокого обучения для анализа эксплуатационных данных котла-утилизатора. Объектом исследования является котел-утилизатор типа ПК-85. Главной целью работы является создание и исследование моделей, предназначенных для решения задач поиска аномалий, классификации эксплуатационных режимов и прогнозирования параметров котла-утилизатора.

Значимостью проведенного исследования является возможность повышения эффективности эксплуатации теплоэнергетического оборудования за счёт внедрения предиктивных алгоритмов анализа данных. Использование технологий машинного и глубокого обучения позволяет повысить точность диагностики и прогноза состояния оборудования, а также сократить объём вычислительных и временных затрат при анализе эксплуатационных данных. В процессе разработки моделей особое внимание уделялось выбору методов обучения и обработке исходных данных. Для задачи поиска аномалий использовался подход *semi-supervised* обучения. Для классификации режимов работы реализована модель глубокого обучения. Задача прогнозирования параметров решалась с использованием классических алгоритмов машинного обучения.

Результатом исследования стал анализ разработанных моделей и сравнение их с базовыми подходами. На основе вычисления метрик качества установлено, что предложенные алгоритмы обладают высокой точностью при обнаружении отклонений и прогнозировании параметров. Таким образом, можно утверждать, что модели позволяют повысить достоверность прогноза, сократить расход ресурсов при обслуживании оборудования и повысить общую надёжность работы котла-утилизатора.

Литература

1. **Белов С.В.** Цифровизация энергетики: концепции, технологии, решения. М.: Вестник МЭИ, 2022.
2. **Jordan M.I., Mitchell T.M.** Machine learning: Trends, perspectives, and prospects: Science, 2015.
3. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** Deep Learning: MIT Press, 2016.

П.А. Зайцева, асп.;
рук. И.Н. Салмаш, к.т.н., доц. (ДонНТУ, г. Донецк)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛА В БАЛАНСЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

С целью обеспечения эффективного использования тепловой энергии возможно применение различных вторичных ресурсов. Одним из важных аспектов является рециркуляция тепла уходящего воздуха.

Для подтверждения технической и экономической эффективности мероприятия был проведен анализ двух аналогичных зданий. Теплотехнические показатели зданий и климатические условия расположения идентичны, отличие лишь в источнике теплоснабжения — (1-й оборудован крышной котельной, 2-й подключён к системе городского централизованного теплоснабжения) [1].

Приведенные данные показывают пониженное потребление тепловой энергии на нужды отопления для здания, оборудованного крышной котельной. Это обусловлено отсутствием протяженных тепловых трасс, что привело к снижению потерь в них. Динамика потребления тепловой энергии, показывает наличие «горизонтального» смещения показателей потребления между объектами, что свидетельствует о влиянии теплоаккумулирующей способности зданий и возможности «полезного» использования вторичных тепловых ресурсов.

В результате проведенных расчётов были получены данные обобщённого теплового баланса зданий (за вычетом влияния аккумуляционной способности тепловых трасс), который показал, что в холодный период времени года тепловые потери за счет воздухообмена (включая инфильтрацию) составляют — 45%. Следовательно, определено, что наиболее целесообразно рассмотреть возможность «полезного» использования тепла, удаляемого через систему вытяжной вентиляции зданий. Предварительные расчёты подтверждают возможность повторного использования тепла уходящего воздуха, что позволит сократить тепловые потери через инфильтрацию на 20%.

Литература

1. **Зайцева, П.А.** Сравнение эффективности работы систем индивидуального и централизованного отопления жилых многоквартирных домов / Металлургия XXI столетия глазами молодых: Материалы VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов / Донецк, ДонНТУ, 2021.

Я.А. Кирюхин, асп.; рук. А.Н. Макеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОЛНЕЧНАЯ ПАНЕЛЬ НОВЕЙШЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Солнечные панели, сенсibilизированные красителем (СПСК) — это особые фотоэлектрические преобразователи, которые представляют собой альтернативу традиционным устройствам прямого преобразования солнечной энергии в электрическую. Их главная особенность работы заключается в том, что поступающее солнечное излучение поглощается сенсibilизатором, который нанесен на поверхность оксидного полупроводника. Дальнейшее разделение зарядов происходит за счет фотоиндуцированной инжекции электронов из красителя в зону проводимости твердого вещества [1].

Производство СПСК, по сравнению с доминирующими в настоящее время кремниевыми преобразователями, менее энергоемко, так как в процессе сборки не требуются высокие температуры или дорогостоящие технологии синтеза. Также они предлагают широкие возможности для их интеграции в современные энерго-проекты и архитектурные решения, благодаря большому выбору цветовой палитры и меньшей чувствительности к интенсивности поступающего излучения.

Главный недостаток подобных устройств — относительно низкая эффективность преобразования поступающей солнечной энергии в электрическую, которая у существующих передовых образцов приблизительно в два раза меньше, чем у широкоиспользуемых кремниевых панелей. Также стоит отметить проблему стабильной работы некоторых компонентов, которая сильно влияет на итоговый эксплуатационный срок [2].

В условиях изыскания путей повышения эффективности СПСК были исследованы основные ее компоненты и получен экспериментальный образец. Кроме того, авторами настоящей публикации получен патент на изобретение [3], в котором предлагается использовать контур циркуляции электролита для повышения надежности работы подобных устройств и технологичности их изготовления.

Литература

1. **Grätzel M.** Dye-sensitized solar cells // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. — 2003. — Vol. 4, P. 145–153.
2. **Chiang Y.** A review of the emerging technologies in solar cells: Dye-sensitized solar cells and quantum dot-sensitized solar cells // Appl. Comput. Eng. 2024. Vol. 61. P. 72–76.
3. **Патент № 2850135** Российская Федерация, МПК H02S 10/32, F24S 20/25. Цвето-сенсibilизированная солнечная панель / Макеев А.Н., Кирюхин Я.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». — № 2025112666; заявл. 14.05.2025; опубл. 05.11.2025, Бюл. № 31.

Д. Алхатиб, асп.; Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОВЕРШЕННОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В МИНИ- И МИКРОКАНАЛАХ

В работе представлена усовершенствованная численная модель плёночной конденсации в мини- и микроканалах, основанная на методах VOF и ETDRK4. Модель эффективно моделирует эволюцию конденсатной плёнки с учётом переохладения стенки, содержания пара, углов наклона и поворота, а также отношения сторон канала. Численные исследования показали, что оптимальные результаты достигаются для мини-каналов с $AR = 2.0-2.2$, $\Delta T = 3-6$ К и угле наклона $30-45^\circ$, при котором коэффициент теплоотдачи достигает 7.8×10^3 Вт/(м²·К), а минимальная толщина плёнки около 16 мкм. Сравнение с экспериментами подтвердило точность модели, позволяя повысить эффективность теплообмена на 20–35% по сравнению с традиционными конструкциями, рис.1.

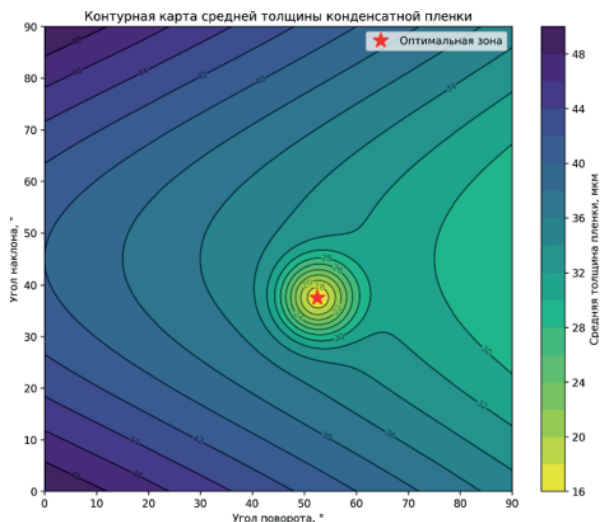


Рис. 1. Контурная карта средней толщины конденсатной пленки

Литература

1. Alkhateeb D., Lyulin Yu. V. Optimizing heat transfer: A numerical investigation of pure water vapor condensation in rotating and inclined minichannels // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 253. P. 127506.

А.А. Иканин, студ.; рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЕРВЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

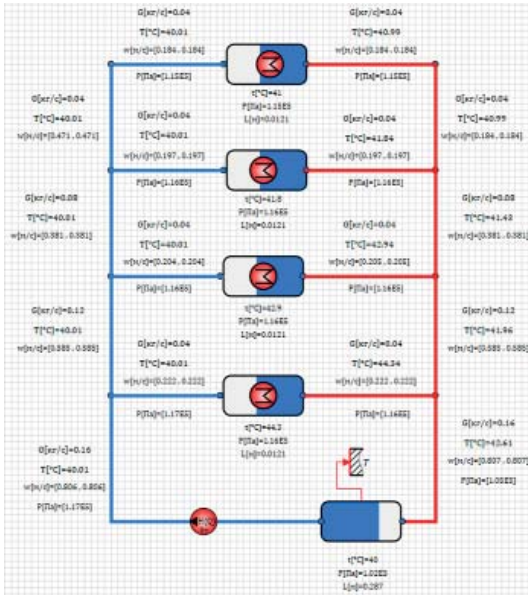


Рис. 1. Схема жидкостного охлаждения

Переход на системы жидкостного охлаждения (СЖО) серверных стоек в ЦОДах, решает проблему высокого тепловыделения современных процессоров, однако и создает новые сложности. Оптимизация работы насосного оборудования в гидравлическом контуре СЖО является важной и актуальной задачей. Возникновение локальных зон перегрева из-за неравномерного расхода теплоносителя и сложность балансировки системы под реальную нагрузку приводят к избыточному энергопотреблению. Данный факт напрямую ухудшает ключевой показатель эффективности дата-центра — PUE (Power Usage

Effectiveness), не позволяя раскрыть весь потенциал жидкостного охлаждения [1]. В данной работе представлена методология создания цифрового двойника СЖО с коллекторной схемой для теплоносителя с использованием программного обеспечения SimInTech 64. Цифровой двойник позволяет в режиме реального времени имитировать распределение температур, давлений и расходов в гидравлическом контуре при различных тепловых нагрузках [2]. На основе его расчетов возможна оптимизация параметров используемого оборудования и балансировка контуров, что демонстрирует потенциал снижения энергопотребления и соответствующее улучшение показателя PUE.

Литература

1. Capozzoli A., Primiceri G. Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies // Energy Procedia — 2015. — Vol. 83. — P. 484–493. — DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.091
2. Щекатурова А.М., Корсакова А.Р. SimInTech: Методика моделирования динамики паротурбинной установки // Наука и образование. — 2017. — № 5. — С. 120–135.

*К.С. Кравцова, студ.; М.А. Боярский, студ.;
рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н, доц. (НИУ «МЭИ»),
Д.С. Филимонов (ООО «ИКСЕЛЕРЕЙТ»)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ХОЛОДНЫХ СТЕН МАШИННОГО ЗАЛА ДАТА-ЦЕНТРА ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ АЭРОДИНАМИКИ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕКЦИЯХ

С увеличением плотности вычислительных мощностей возрастает и тепловыделение серверного оборудования, что ставит перед системами охлаждения задачу эффективного отвода теплоты [1, 2]. Недостаточная эффективность систем охлаждения приводит к увеличению энергопотребления, переразмериванию оборудования, а в некоторых случаях и к перегреву серверных стоек [3]. В ходе испытаний машинного зала дата-центра были выявлены такие недостатки, как избыточная модуляция, значительные потери напора в вентиляционных секциях и использование неполной площади теплообменных аппаратов.

В рамках данной работы проведено детальное исследование воздухообмена в машинном зале с использованием CFD-моделирования при различных нагрузках вентиляционной секции. На основе результатов численных расчетов для вентиляционных секций разработана и построена 3D модель аппарата с угловыми направляющими, который позволяет улучшить аэродинамику и теплообмен.

Полученные результаты позволяют оценить влияние прототипа направляющего аппарата на работу вентиляционной секции, а также провести его испытания в реальных условиях для верификации.

Литература

1. ASHRAE. Thermal Guidelines for Data Centers. 5th ed. Atlanta, GA: ASHRAE, 2021.
2. Capozzoli A., Primiceri G. Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies // Energy Procedia. — 2015. — Vol. 83. — P. 484–493. — DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.091
3. Alkrush A., Salem M.S., Abdelrehim O., Hegazi A.A. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration. — 2024. — Vol. 160. — P. 246–262.

*М.А. Боярский, студ.; К.С. Кравцова, студ.;
рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»),
Д.С. Филимонов (ООО «ИКСЕЛЕРЕЙТ»)*

РАЗРАБОТКА ВЫХОДНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕКЦИИ ДАТА-ЦЕНТРА

Современные дата-центры предъявляют повышенные требования к эффективности систем вентиляции, поскольку стоимость охлаждения составляет значительную часть их эксплуатационных затрат [1]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения энергетических потерь и обеспечения устойчивого распределения воздушных потоков в вентиляционных секциях, что напрямую влияет на надежность работы серверного оборудования и общий показатель PUE.

В вентиляционных секциях часто возникает проблема неравномерности потока вследствие интенсивной турбулентности и вторичных вихревых структур за рабочим колесом вентилятора. Это приводит к ухудшению теплоотвода, росту энергопотребления и снижению эффективности всей секции.

В данной работе предложено решение, которое заключается в разработке выходного направляющего аппарата. Геометрия аппарата была отредактирована методом ортогональной оптимизации с использованием CFD-моделирования для подбора оптимальной геометрии лопаток и их пространственного расположения [2]. По результатам расчетов была изготовлена физическая модель методом 3D-печати, а также выполнен гармонический и прочностной анализ конструкции для подтверждения ее работоспособности в условиях реальных эксплуатационных нагрузок. Разработанный аппарат обеспечивает выпрямление потока и повышение аэродинамической эффективности вентиляционной секции дата-центра.

Литература

1. **Xu S., Zhang H., Wang Z.** Thermal Management and Energy Consumption in Air, Liquid, and Free Cooling Systems for Data Centers: A Review // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 3. — P. 1279. — DOI: 10.3390/en16031279.
2. **Liu R., Xu S., Sun K., Ju X., Zhang W., Wang W., Ma X., Pan Y., Li J., Ren G.** CFD analysis and optimization of axial flow fans // *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. — 2024. — Vol. 15. — Article 11. — DOI: 10.1051/smdo/2024007.

К.В. Тянтерев, студ.; А.Н. Макеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Развитие фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в России является одним из ключевых направлений возобновляемой энергетики [1]. Несмотря на достигнутый прогресс, современные фотоэлектрические технологии сталкиваются с проблемами оптических потерь, рекомбинационных процессов и ограниченного КПД традиционных материалов. Внедрение новых антиотражающих покрытий, многослойных структур и перспективных полупроводниковых композиций позволяет существенно повысить эффективность преобразования солнечной энергии [2].

В рамках научного исследования проанализированы оптические и электрофизические характеристики перспективных ФЭП, получены практические рекомендации по выбору материалов и оптимизации архитектуры фотоэлементов. Выбраны инженерные решения для минимизации потерь на отражение и рекомбинацию, среди которых, прежде всего, следует отметить нанесение просветляющих покрытий, создание текстурированной поверхности фотоэлемента.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании высокоэффективных солнечных модулей нового поколения, — создании автономных энергосистем для удаленных регионов. Практическая реализация предложенных подходов будет способствовать снижению себестоимости преобразования солнечной энергии и укреплению позиций России на мировом рынке возобновляемой энергетики.



Рис. 1. Солнечные ресурсы России, кол-во часов в год

Литература

1. **Минин, А.А.** Перспективы использования фотоэлектрических преобразователей в мире и в России / А.А. Минин, А.С. Матрунчик // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7, № 1. — С. 74–81. — DOI 10.15593/2224-9826/2016.1.10. — EDN VPZUWV.
2. **Гременок, В.Ф.** Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский; Национальная Академия наук Беларуси. Государственное научное учреждение Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников. — Минск : Издательский центр БГУ, 2007. — 222 с. — ISBN 985-476-443-5. — EDN IZHXXI.

К.Е. Семенов, студ.; А.Н. Макеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Растущий спрос на энергию и необходимость снижения зависимости от ископаемого топлива создают насущную потребность в масштабировании экологически чистых и устойчивых решений в энергетическом секторе [1]. В отмеченном контексте повышение эффективности солнечных коллекторов (СК) — ключевая задача в контексте глобального перехода к возобновляемой энергетике.

Рабочие характеристики солнечных коллекторов определяются рядом взаимосвязанных факторов, значительное влияние на которые оказывают оптические и тепловые потери, снижающие общий КПД системы. Кроме того, существенное влияние на эксплуатационные характеристики оказывают режимные параметры, такие как интенсивность солнечной радиации, температура окружающей среды и расход теплоносителя.

Проведённый анализ теплотехнических и гидравлических параметров современных солнечных коллекторов позволил разработать практические рекомендации по оптимизации их ключевых элементов. Среди наиболее эффективных мероприятий стоит отметить применение вакуумных камер и селективных поглощающих покрытий [2].

Результаты настоящего исследования могут быть применены для создания высокоэффективных солнечных установок в теплоэнергетике, коммунальном хозяйстве и иных энергосберегающих технологий. Внедрение разработанных решений, направленных на повышение КПД СК, позволит не только сократить потребление ископаемого топлива и снизить объем парниковых выбросов, но и обеспечить повышение эффективности автономного теплоснабжения на их основе.

Литература

1. **Хужаев, П.С.** Повышение эффективности солнечного коллектора / П.С. Хужаев, Р.С. Назаров, А.Б. Алимардонов // Бюллетень науки и практики. — 2017. — № 3(16). — С. 64–67. — DOI 10.5281/zenodo.399069. — EDN YHLZOD.
2. **Сапсай, И.Н.** Повышение эффективности плоского солнечного коллектора / И.Н. Сапсай // Наука, техника и образование. — 2019. — № 5(58). — С. 40–43. — EDN VVYHGE.

В.В. Шаронов, студ.; рук. Ю.В. Шацких, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В настоящее время явным трендом развития технологий является повышение удельной мощности единицы оборудования. Следствием этого является повышение требований к материалам, используемым в технике. Особенно это заметно в системах нагрева и охлаждения, в которых требуется осуществлять подвод или отвод теплоты от рабочих участков. При повышении компактности, требуется интенсифицировать процесс теплообмена, и зачастую для этого требуется применение новых типов теплоносителей с улучшенными физическими свойствами. Появление синтетических масел и наномодифицированных жидкостей требует также развития методов исследования их теплофизических свойств, так как общепринятые методы обладают рядом существенных недостатков применительно к таким типам веществ — электропроводность, влияние конвекции и другие.

В настоящей работе предлагается применение модифицированного метода регулярного теплового режима, адаптированного для жидких теплоносителей. Данный метод достаточно прост в реализации и не требует дорогостоящего и технически-сложного оборудования, имеет достаточную для инженерного применения точность и может применяться как для твердых, так и для жидких сред [1]. В предлагаемой работе, в отличие от классической реализации, метод учитывает влияние оболочки измерительного калориметра и использует схему двойного приближения, что позволяет корректно определять температуропроводность, теплопроводность и теплоёмкость жидких теплоносителей различного типа, включая перспективные наножидкости [2].

Литература

1. **Кондратьев Г.М.** Регулярный тепловой режим. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 408 с.
2. **Шацких Ю.В., Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Милютин В.А.** Использование метода регулярного режима для экспериментального определения теплопроводности жидкости // ТВТ. 2023. Т. 61. № 4. С. 525–529.

*Д.А. Михальцов, студ.;
рук. Д.В. Сиденков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ДЛЯ СИСТЕМ ИНТЕНСИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Широкое применение пленочных течений в высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическое строение, энергетика и термоядерные установки, обуславливают актуальность разработки эффективных методов расчета теплообмена и гидродинамики. В работе выполнена численная реализация одномерной математической модели, учитывающей ламинарные, переходные и турбулентные режимы, а также поперечный поток массы на проникаемых поверхностях.

На основе системы уравнений сохранения импульса, энергии и турбулентной энергии в формулировке Колмогорова–Прандтля разработан расчетный алгоритм в среде MathCad и программа на Python. Проведены параметрические расчеты, позволившие сравнить эффективность теплоносителей (вода и жидкий литий), оценить влияние режима течения на теплообмен и проанализировать устойчивость пленочного течения.

Установлено, что жидкий литий обладает на порядки более высокой способностью к отводу тепла ($St \sim 0.2$) по сравнению с водой ($St \sim 0.001\text{--}0.004$) и сохраняет умеренную температуру. Максимальная эффективность теплоотвода в пленке воды достигается в ламинарном режиме с малым числом Рейнольдса ($Re=25$, $St=0.00603$). Выявлен критический параметр для захлебывания течения — начальная скорость пленки ≤ 0.005 м/с, при которой течение становится нестабильным независимо от толщины пленки и тепловой нагрузки.

Полученные результаты представляют практическую ценность для проектирования высокоэффективных систем охлаждения и элементов термоядерных установок.

Литература

1. **Umana, E.M.; Yang, X.** Review of Film Cooling Techniques for Aerospace Vehicles. *Energies* 2025, 18, 3058.
2. **Солодов, А.П.** Одномерная модель гидродинамики и теплообмена при пленочном течении на проникаемой поверхности // *Теплоэнергетика*. — 2024. — № 4. — С. 71–81.
3. **Писарев А.А., Вертков А.В., Жарков М.Ю., Мазуль И.В., Пискарев П.Ю., Тарасюк Г.М.** Текущий жидкий литий как материал, обращенный к плазме // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. — 2024. — Т. 47, вып. 1.

Ж. Балкес, асп.; Д.В. Сиденков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБ В ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Интенсивное развитие компактных энергонапряжённых технических систем различного предметного назначения привело к необходимости их эффективного охлаждения для поддержания стабильного температурного режима [1]. Создание нового высокоэффективного теплообменного оборудования напрямую связано с интенсификацией процессов течения и теплообмена, в том числе за счет изменения геометрии [2].

В работе рассматривается возможность использования труб каплевидного профиля в качестве теплообменных поверхностей.

Исследование проводится путем создания каплевидных трубных пучков с использованием ANSYS. Проведено сравнение пучков каплевидных и круглых труб, а также труб, оснащённых рёбрами высотой 3 и 6 мм (рис. 1).

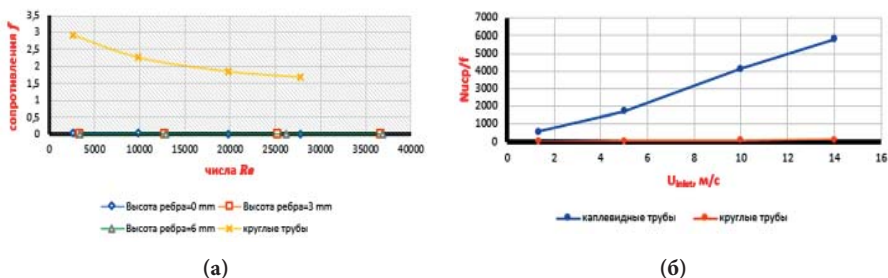


Рис. 1. График зависимости коэффициента гидравлического сопротивления f от числа Re при различной высоте ребер и с круглыми трубами (а); сравнение результатов каплевидных и круглых труб (б)

Результаты показали, что коэффициенты трения пучков каплеобразных труб с оребрением высотой 3 и 6 мм практически совпадают с коэффициентами трения пучков труб без оребрения. Интегральный показатель эффективности Nu_{cp}/f для каплевидных труб оказался выше в 40–70 раз.

Литература

1. Sayed Ahmed E.S.A., Mesalhy O.M., Khass T.M., Hassan A.H. Parametric study of air cooling process via water cooled bundle of wing shaped tubes. Egyptian Int. J. of Eng. Sci. and Technology 2012, v.15, no.3, pp.1172–1184.
2. Деев Р., Сиденков Д.В. Численное исследование теплообмена и аэродинамики односторонних труб каплевидной формы / Вестник Международной академии холода 2020, № 3, с. 91–99.

*А.С. Бухтояров, студ.; Д.П. Шумка, студ.;
рук. Д.В. Сиденков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБКАХ

Интерес к изучению теплообмена при конденсации пара на поверхности труб постоянно актуален в связи с необходимостью уточнения методов расчета (конструирования) различных теплообменников-конденсаторов в высокотехнологичных областях. В работе представлена разрабатываемая экспериментальная установка для исследования теплообмена при пленочной конденсации пара на поверхности каплевидных труб. На основе системы уравнений неразрывности, сохранения импульса, энергии для ламинарного режима движения пленки конденсата по криволинейной поверхности представлен расчетный алгоритм в программе на языке Python, позволяющий оценивать теплообменные и гидродинамические характеристики при конденсации на каплевидной трубке. Проведены предварительные расчеты, позволившие определить толщину пленки в различных сечениях каплевидной трубки и оценить величину локальных и средних значений коэффициента теплоотдачи. Адаптирована и дополнена каплевидными трубками модель MathCad-расчета теплообмена и гидродинамики горизонтального конденсатора пентана установки, работающей по «органическому» циклу Ренкина. Показано, что имеется возможность отвода конденсата с поверхности наклонной каплевидной трубы по нижней (короткой) и по верхней стороне поверхности трубки, что должно способствовать интенсификации процесса. Полученные результаты представляют практическую ценность для проектирования высокоэффективных систем энергетических установок.

Литература

1. **Деев Р.** Экспериментальное и численное исследование термонапряженного состояния и гидродинамики канального теплообменника тригенерационной установки / Автореф. дисс. канд. техн. наук, М. МЭИ, 2023, 20 стр.
2. **Никитин Н.Н., Семенов В.П.** Влияние сил поверхностного натяжения на течение пленки и теплоотдачу при конденсации пара на наклонных некруглых трубах. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2007. — № 11–12. — с. 3–11.

А.А. Юрасов, студ.; рук. А.А. Сухих, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТУРБИННОГО КОНТУРА НА ОКТАФТОРПРОПАНЕ ДЛЯ АЭС С ТЯЖЕЛОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Применение неводных рабочих тел в турбинном контуре нового поколения АЭС на быстрых нейтронах вместо водяного пара способно обеспечить более высокие показатели энергоэффективности и экологической безопасности.

В качестве объекта исследования рассмотрен реактор БРЕСТ-300 [1], использующий в первом контуре свинцовый теплоноситель (рис. 1). В качестве рабочего тела предлагается использовать инертный, термически стойкий, пожаро- и взрывобезопасный фторуглерод — октафторпропан (R218, химическая формула C_3F_8).

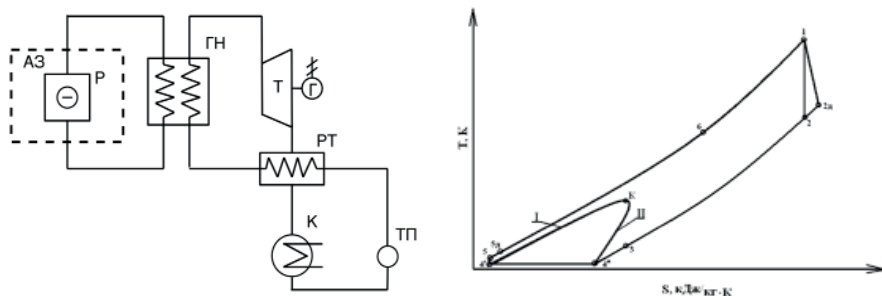


Рис. 1. Тепловая схема турбинного контура и T, s-диаграмма термодинамического сверхкритического цикла с регенерацией на C_3F_8

Результаты расчёта теплосиловой схемы турбинного контура с регенератором, который обеспечивает как высокий уровень средней интегральной температуры подвода теплоты, так и превышение температуры обратного потока над температурой затвердевания свинца на 56°C , подтверждают возможность достижения высокой термодинамической эффективности в случае внедрения в качестве рабочего тела октафторпропана. При мощности турбины 300 МВт и параметрах на её входе 6 МПа и 525°C , температуре конденсации 20°C внутренний КПД цикла равен 49%.

Литература

1. Сухих А.А., Милютин В.А., Антаненкова И.С. Термодинамическая эффективность фторуглеродов как рабочих тел в теплосиловых циклах АЭС. Электрические станции, 2010, № 10, с. 2–8.

А.В. Боровик, студ.; рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОБЛОКОВ ДЛЯ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЕРВЕРНЫХ СТОЕК В ЦОД

В условиях увеличения вычислительной мощности и плотности размещения серверного оборудования в центрах обработки данных (ЦОД) традиционные системы воздушного охлаждения сталкиваются с ограничениями эффективности. В качестве перспективного решения для эффективного отвода тепла от высоконагруженных процессоров рассматриваются системы жидкостного охлаждения. В рамках данного исследования представлен обзор современных технологий производства одного из ключевых компонентов таких систем — теплообменных элементов, известных как водоблоки.

Анализируются различные методы изготовления теплообменных поверхностей и компоновочных элементов водоблоков: механическая обработка с использованием станков с числовым программным управлением (ЧПУ), аддитивные технологии (3D-печать из металлических порошков), и метод лазерного выжигания.

Представлен сравнительный анализ указанных методов производства теплообменных элементов, включающий описание принципов формообразования, технологических характеристик, основных преимуществ и недостатков, а также возможностей применения для решения задач, связанных с обеспечением эффективного теплоотвода в условиях высоких тепловых нагрузок.

Литература

1. **Kanbur B.B., Seat M.H.** Experimental indirect cooling performance analysis of the metal 3D-printed cold plates with two different supporting elements // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2023. — Vol. 148. — Art. 107046.

*А.А. Скворцов, студ.; Ф.Н. Сивкин, студ.;
рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Быстрый рост производительности современных процессоров сопровождается увеличением тепловыделения, что усложняет обеспечение эффективного охлаждения. В центрах обработки данных эта проблема наиболее критична: традиционные воздушные системы не справляются из-за неравномерного распределения потоков, смешивания горячего и холодного воздуха и высокого энергопотребления. Альтернативой становится жидкостное охлаждение (СЖО), особенно водяное, обладающее высокой теплоёмкостью и способностью эффективно отводить тепло от высоконагруженных компонентов. Такое решение повышает энергоэффективность ЦОД и снижает температурные перепады между процессором и охлаждающей средой [1].

В рамках работы были проведены испытания водоблока системы жидкостного охлаждения (СЖО) на существующем экспериментальном стенде. Измерена температура стенки теплообменной поверхности со стороны нагрева в зависимости от эксплуатационных параметров эксперимента: тепловой нагрузки, расхода воды и температуры воды на входе. Полученная температура характеризует температуру процессора в реальных условиях эксплуатации при использовании жидкостной системы охлаждения серверов. Результаты исследования демонстрируют, что при использовании данного водоблока в жидкостной системе охлаждения серверов температура процессора не будет превышать 70 °С для типичных тепловых нагрузок, характерных для реального оборудования, и температуры охлаждающей воды в диапазоне 40–50 °С. Применение водоблоков позволяет эффективно отводить тепло от процессоров при подаче теплоносителя на вход с температурой 40–50 °С, что открывает перспективы использования данного метода в системах охлаждения с функцией «free-cooling» и существенно снижает энергопотребление и эксплуатационные затраты в центрах обработки данных (ЦОДах).

Литература

1. **Martinez V.A., Caceres C., Ortega A.** Experimental validation of the effectiveness-NTU approach for single-phase liquid cold plates and a consistent definition of thermal resistance // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025. V. 247. P. 127128.

А.А. Ашихмина, И.А. Сураев, студ.;
рук. Р.А. Сафиуллин, к.ф.-м.н., доц. (НФ УУНиТ, Нефтекамск)

ТЕПЛОВОЕ СОПРЯЖЕНИЕ ДАТА-ЦЕНТРОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА С ЖКХ

Работа большинства дата-центров по обслуживанию искусственного интеллекта (ИИ) подразумевает синхронную и согласованную работу большого количества серверов. Это связано с несколькими аспектами функционирования инфраструктуры ИИ:

1. Обработки больших объемов данных. Современные системы ИИ требуют обработки огромных массивов данных (Big Data) для обучения нейронных моделей, анализа и принятия правильных решений из альтернативно возможных. Для этого используются высокопроизводительные вычислительные мощности, распределенные среди сотен или даже тысяч серверов.
2. Высокой доступностью и отказоустойчивостью. Дата-центры проектируются с гарантией обслуживания даже при выходе из строя отдельных компонентов. Резервирование оборудования и электроснабжения, использование кластерных технологий обеспечивают устойчивость к сбоям и минимизацию потерь данных для энергоэффективности.
3. Энергосбережения и охлаждения. Большое количество работающих серверов генерирует значительное количество тепловой энергии.

В своей работе мы предлагаем эффективно отводить от них большое количество тепловой энергии в городскую систему отопления ЖКХ. Созданные системы воздушного и водяного охлаждения позволяют поддерживать оптимальные условия их эксплуатации. Это позволит транспортировать тепловую энергию также и в различные предприятия (теплицы, птицеводческие и животноводческие комплексы), что сэкономит большое количество энергетического углеводородного сырья в стране [1].

Проведенные нами расчеты показывают, что при круглосуточной непрерывной работе оборудования дата-центра (серверной системы) мощностью 100 кВт за год он выделяет до 3 ТДж тепловой энергии, что сопоставимо с работой мини КЭС.

Литература

1. **Safiullin R.A.** Mathematical Model of the Electrothermal Process of Heating the Formation by the Ultra-Frequency Electromagnetic Waves / R. Safiullin, A. Khalikov, I. Yangirov // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 232. P. 349–358. — DOI 10.1007/978-981-16-2814-6_30.

А.И. Коновалова, студ.;

рук. М.Г. Зеодинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», ОИВТ РАН, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТОКОПОДВОДОВ НА ИНТЕГРАЛЬНУЮ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Ввиду интенсивного развития компьютерных способов вычисления появилась возможность проводить измерения с максимальной скоростью и более результативно решать большинство теплофизических задач при применении современных средств диагностики. В связи с этим был разработан специализированный программный комплекс, позволяющий обрабатывать экспериментальные данные в кратчайшие сроки с наибольшей точностью.

С помощью разработанного комплекса проведены исследования на образцах вольфрамовой проволоки различных диаметров. Из полученных результатов следует, что применение материалов с большим диаметром позволяет получить более точные результаты измерения. Это связано с минимизацией кондуктивной составляющей. Однако, устранить отклонения значений от теоретических в полном объеме не удалось.

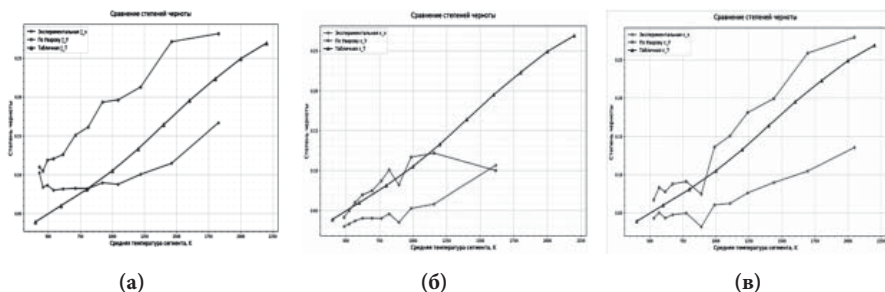


Рис. 1. Сравнение полученных результатов для вольфрамовой проволоки с диаметром 0,14 мм (а), 0,19 мм (б) и 0,23 мм (в)

Литература

1. Шейндлин, А.Е. Излучательные свойства твердых материалов : справочник / Л.Н. Латыев, В.А. Петров, В.Я. Чеховской, Е.Н. Шестаков; под общ. ред. А.Е. Шейндлина. — Москва : Энергия, 1974. — 472 с. — Текст : непосредственный.
2. Уваров В.М. К определению степени черноты тела / В.М. Уваров, Е.С. Громова, Г.Г. Хохолов. — Текст: непосредственный // Национальная ассоциация ученых. — 2020. — № 52. — С. 53–54.

*Ф.Н. Сивкин, А.А. Скворцов, студенты;
рук. Ю.В. Люлин, к.ф.-м.н, доц. (НИУ «МЭИ»)*

CDF-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА- ВОДОБЛОКА ДЛЯ ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЕРВЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Увеличение вычислительной мощности электронных устройств сталкивается с фундаментальной проблемой тепловыделения. Усиление этого процесса в современных центральных процессорах требует поиска более эффективных решений, чем традиционная система воздушного охлаждения, что приводит к необходимости внедрения новых методов, таких как жидкостные системы охлаждения.

В рамках данного исследования проводится компьютерное моделирование тепловых и гидродинамических процессов в медном теплообменнике. Исходная конфигурация теплообменника включает ребра высотой 3 мм, длиной 35 мм, шириной 0,3 мм и расстоянием между ними 0,4 мм. Моделирование функционирования устройства осуществляется при тепловой нагрузке 500 Вт и расходе теплоносителя 0.01 кг/с, который поступает при температуре 20 °С. Основной целью исследования является оптимизация конструкции теплоотводящей поверхности. Проведен анализ влияния различных геометрических параметров ребер (формы, конфигурации, размеров) на эффективность охлаждения. Критерии модернизации включают повышение интенсивности теплосъема, снижение гидравлического сопротивления и уменьшение металлоемкости конструкции.

На основании результатов численных расчетов планируется разработка усовершенствованного водоблока, который благодаря целенаправленному изменению геометрии каналов обеспечит надежный тепловой режим для высокопроизводительных процессоров, способствуя их стабильной и долговечной эксплуатации.

Литература

1. Wu, Zhijun & Zhang, Guanyu & Lu, Shaoan & Leng, Pengfei & Yu, Yang & Deng, Jun & Huang, Weidi. A comprehensive review of cold plate liquid cooling technology for data centers // Chemical Engineering Science. 2025.V.310.P. 121525

Ж.В. Мфег, асп.; рук. В.С. Глазов, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМАТИВНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ОКОН В ЕГО НАРУЖНОМ ОГРАЖДЕНИИ

Быстрое развитие энергоэффективного строительства и широкое внедрение окон с низкой теплопередачей позволяют значительно снижать тепловые потери, однако одновременно может уменьшаться пропускание естественного света, что затрудняет обеспечение нормативного уровня освещённости в помещениях. В этих условиях становится актуальной задача разработки систем, способных поддерживать нормативную освещённость при сохранении энергоэффективности [1].

Известна система нормативного освещения с адаптивной регулировкой (НО-АР) [2], предназначенная для оценки и оптимизации естественного освещения помещений. В данной работе предлагается интегрированная система, которая объединяет продвинутое фотометрическую модель энергосберегающих окон (учитывающую спектральные свойства покрытий Low-E и динамику естественного освещения), расчет внутренней освещённости на основе коэффициента естественной освещённости с учётом геометрии помещения и отражающих свойств внутренних поверхностей, а также алгоритм многомерной оптимизации, одновременно регулирующий параметры окон, коэффициенты отражения стен, потолка и пола, а также конфигурацию помещения.

Внедрение предложенного подхода способствует созданию комфортной и энергоэффективной внутренней среды в современных зданиях, предоставляя проектировщикам и эксплуатационным службам эффективный инструмент, соответствующий требованиям нормативов по энергоэффективности и светопропусканию остекления [3].

Литература

1. Escobar I., Orduna-Hospital E., Aporta J., Sánchez-Cano A. (2024). Efficient Daylighting : The Importance of Glazing Transmittance and Room Surface Reflectance. Buildings, 14(10), 3108.
2. Ye, Q., Dai, H., Yan, Y., Wang, L., Du, X., Wang, Y., Han, Z., & Guo, R. (2025). Transparent and heat-insulation bionic hydrogel-based smart window system. arXiv preprint.
3. СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещённого освещения».

А.А. Гребенщиков, студ.;
рук. М.Г. Зеодинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ В СРЕДЕ ANSYS

Вольфрам часто применяется в качестве эталонного материала, имеющего хорошо воспроизводимую зависимость удельного электрического сопротивления от температуры. Поэтому вольфрамовая проволока была выбрана в качестве материала, на котором моделируются процессы нагрева и охлаждения для определения излучательной способности. В работе представлены результаты численного моделирования нестационарных процессов нагрева и охлаждения тонкой вольфрамовой проволоки в среде ANSYS, учитывающего влияние теплообмена излучением с окружающей средой на тепловые характеристики.

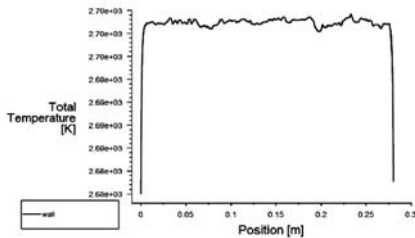


Рис. 1. График распределения температуры по длине при нагревании

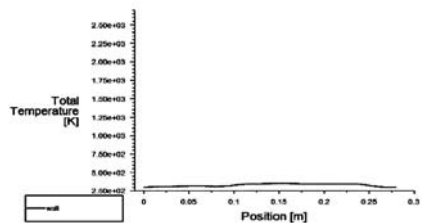


Рис. 2. График распределения температуры по длине при полном охлаждении

Литература

1. Ф.Ф. Цветков. Тепломассообмен: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. — 562 с.
2. М.Г. Зеодинов, А.А. Пронкин, Д.А. Крыницкая. Исследование излучательной способности тонкой вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью в режиме нестационарной теплопроводности. Теплоэнергетика. — 2023. — № 3. — С. 58–64.

Е.А. Ушак, асп.; рук. А.В. Рыженков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ВЫСОКОТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Развитие технологий, искусственного интеллекта и облачных сервисов стимулирует рост вычислительных мощностей и, как следствие, масштабов и числа центров обработки данных (ЦОД). С другой стороны, наблюдается тенденция уменьшения массогабаритных характеристик и повышения мощностей силовой электроники. Вследствие этого возрастает плотность теплового потока высокотеплонагруженных элементов, вызывая их перегрев, что ухудшает их производительность и надежность.

Основные проблемы систем охлаждения в ЦОД связаны с высоким энергопотреблением: до 50% от общих затрат энергии тратится на кондиционирование помещений с серверными стойками и непосредственное охлаждение процессоров. При этом высокое гидравлическое сопротивление, возникающее из-за большого количества разветвлений в контурах системы охлаждения и в теплообменных аппаратах, существенно снижает эффективность и надежность систем отвода тепла, а также повышает затраты на транспортировку теплоносителя.

Перспективным решением для повышения эффективности является модификация функциональных поверхностей системы и теплообменного оборудования с использованием алифатических аминов, таких как октадециламин. При обработке системы октадециламином формируется гидрофобное покрытие, которое снижает смачиваемость поверхности. В результате возникает эффект скольжения жидкости, что приводит к снижению гидравлического сопротивления на 20–30% [1]. В работе проведен анализ по применению данного решения в системе со спиртосодержащим теплоносителем, что позволяет уменьшить энергозатраты на транспортировку теплоносителя и повысить эффективность отвода тепла от высокотеплонагруженных элементов в различных сферах.

Литература

1. Результаты работ по повышению эффективности систем централизованного теплоснабжения на основе ПАВ-технологии за 2003–2013 гг. / А.В. Рыженков, М.В. Лукин, С.И. Погорелов [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. — 2014. — № 2(25). — С. 18–22. — EDN SFIYIL.

Х. Арус, асп.; рук. В.В. Синявский, к.т.н., доц. (МАДИ, Москва)

ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРОВ ДЛЯ ПОДБОРА ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ НАДДУВА ДИЗЕЛЯ

В настоящее время на дизелях все чаще применяют цикл Миллера совместно с двухступенчатой системой наддува. Цикл Миллера позволяет уменьшить выбросы оксидов азота до 60% [1] за счет раннего закрытия впускного клапана, однако это приводит к снижению до двух раз наполнения цилиндров воздухом и, соответственно, мощности. Для компенсации потери мощности необходимо увеличить практически вдвое давление наддува, что обеспечивает двухступенчатая система.

Для двухступенчатой системы необходимо подобрать турбокомпрессоры, что требует проанализировать расчетным путем большое количество турбокомпрессоров [2]. Для этого нужно каждый раз вводить в программу характеристики нового компрессора, что требует много времени и усилий.

В данной работе предлагается методика получения обобщенных характеристики компрессоров. Используются экспериментальные характеристики трех подобных по конструкции компрессоров одного производителя с диаметром колес от 50 до 90 мм. Определены безразмерные параметры, имеющие близкие значения для всех трех компрессоров. Разработана методика получения из размерных параметров безразмерных, которые затем описываются полиномами. Далее, задав всего несколько геометрических размеров компрессора, можно путем обратного расчета получить из полиномов характеристику любого компрессора в диапазоне диаметра колёс от 50 до 90 мм.

Литература

1. **Yang, F.** Research on the Influence of Miller Cycle on the High Strength Diesel Engine Performance. Master's Thesis, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 2020.
2. **Khanyi N., Inambao F., Stopforth R.** Energies, 2025, vol. 18, no. 8, pp. 1880, DOI10.3390/en18081880.

А.Д. Лобов, асп.;

рук. В.С. Глазов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПРАВЛЕННОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ источника [1] показал, что величина направленной излучательной способности оказывает влияние на геометрические параметры оребренного конвектора, при которых достигается максимальный суммарный тепловой поток, исходящий от него. Часто, конвективную поверхность теплообменных аппаратов (радиаторов и конвекторов) используемых для поддержания комфортных условий внутри помещений покрывают различными покрытиями, в том числе и лакокрасочными материалами. Анализ литературы [2–4], посвящённой методам расчёта теплообменных аппаратов с учётом направленной излучательной способности, показал отсутствие данных о зависимости этой величины от угла излучения для лакокрасочных материалов.

В ходе работы была разработана экспериментальная установка и методика для определения направленной излучательной способности лакокрасочных покрытий. Используя разработанную методику, получен график (рис. 1) изменения величины направленной излучательной способности лакокрасочных покрытий одного состава, но различных цветов (кривые 1 — белый, 2 — синий, 3 — зелёный, 4 — красный). Проверка результатов проведена сравнением тепловых потоков исходящих с поверхности исследуемого объекта, и поступающего на его нагрев.

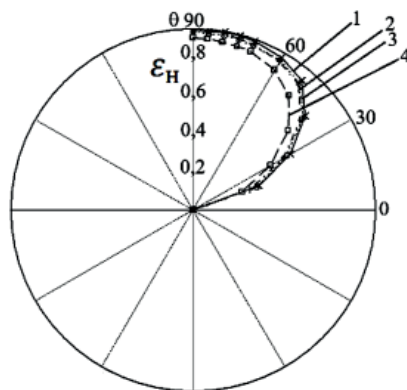


Рис. 1. Величина направленной излучательной способности

Литература

1. Глазов, В.С. Оценка влияния направленной излучательной способности на величину радиационно-конвективного теплового потока, исходящего от конвектора / В.С. Глазов, Ч.А. Кадыров, А.Д. Лобов, С.Л. Плечев // Промышленная энергетика. — 2025. — № 10. — С. 51.
2. Сперроу, Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Сперроу, Р.Д. Сесс; пер. с англ. — Л.: Энергия, 1971. — 282 с.
3. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл; пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 936 с.
4. Блох, А.Г. Теплообмен излучением. Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлёв, Л.Н. Рыжков. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 384 с.

Р.И. Соловьев, соиск.;
рук. Ю.В. Караева, к.т.н. (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ ПОДОГРЕВ В АППАРАТАХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

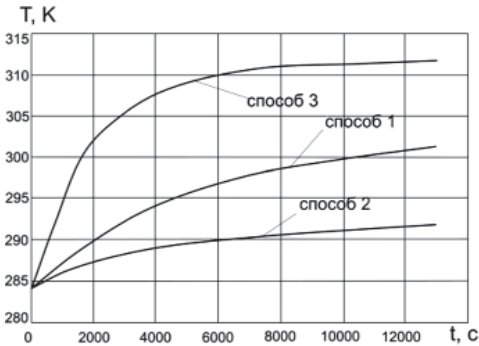


Рис. 1. Динамика средней температуры в аппарате

жидкости в аппарате и циркуляционный способ поддержания температурного режима.

Было рассмотрено 3 способа циркуляционного подогрева: первый и второй распространены на практике, а третий разработан авторами.

Способ 1. Рециркуляция жидкости осуществляется через подводящий патрубок, расположенный сверху, в крышке аппарата (по центру), и отводящий патрубок на дне аппарата (по центру).

Способ 2. Рециркуляция жидкости осуществляется через подводящий и отводящий патрубки, которые располагаются на противоположных сторонах корпуса аппарата.

Способ 3. Рециркуляция жидкости осуществляется через два подводящих и один отводящий патрубок. Жидкость под давлением, с помощью насоса, подается через первый подводящий патрубок в придонную область аппарата и на уровне зеркала жидкости. Отводящий патрубок располагается на боковой стороне корпуса аппарата.

Для численных исследований использовался пакет моделирования *COMSOL Multiphysics 3.5a*. На рис. 1 представлено изменение средней температуры в аппарате.

Литература

1. Arnau R., Climent Ja., Martínez-Cuenca R. [et al.] Evaluation of hydraulic mixing performance in a full-scale anaerobic digester with an external liquid recirculation system using CFD and experimental validation // Chemical Engineering Science. 2022. — Vol. 251. — P. 117392. — DOI 10.1016/j.ces.2021.117392.

Направление X
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
Power engineering machinery

Руководитель направления:

И.о. директора института
энергомашиностроения
и механики НИУ «МЭИ»
к.т.н. Митрохова Ольга Михайловна

Секция 52

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИГАТЕЛИ

Power engineering installation and engines

Председатель секции: д.т.н., профессор Росляков Павел Васильевич

Секретарь секции: д.т.н., доцент Богомолова Татьяна Владимировна

Н.П. Йин, студ.; рук. Т.В. Богомолова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА ЭРОЗИЮ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЛАЖНОПАРОВЫХ ТУРБИН

Мощные паровые турбины для АЭС выполняются как быстроходными, так и тихоходными с половинной частотой вращения. Целью данной работы является сравнение эрозийного износа входных кромок рабочих лопаток последних ступеней данных турбин на расчетном режиме работы. Очевидно из формулы Н.Е. Жуковского $p = \alpha \rho_{\text{в}} w_{\text{к}}^2 a_{\text{в}}$, которая определяет давление при ударе капель о поверхность лопатки, что снижение частоты вращения приводит к пропорциональному снижению ударного давления. Однако тихоходные турбины имеют и увеличенные габариты проточной части, в результате чего растут окружные скорости на периферии рабочих лопаток.

Для сравнения были выполнены расчеты последних ступеней с реальными размерами последних ступеней турбин К-1200-6,8/50 и К-1200-6,8/25 по программе, учитывающей пространственный характер течения, с теплоперепадами, оптимальными для этих ступеней. Давление в конденсаторе принято одинаковым для двух турбин и равным $p_{\text{к}} = 0,005$ кПа. В результате расчетов были получены поля скоростей и давлений во всей области течения.

Оценка эрозии производилась на основе простой полуэмпирической формулы

$$E_y = [(3,28u_{\text{п}} - 800)/1000]^2 y_1^{0,8}, \quad (1)$$

где E_y — условный коэффициент эрозии; $u_{\text{п}}$ — периферийная окружная скорость рабочих лопаток; y_1 — степень влажности перед рабочими лопатками. Причем считается, что при $E_y < 2$ незначительная эрозия и надежная работа турбины; при $2 < E_y < 4$ допустимая эрозия; при $E_y > 4$ значительная эрозия, работа турбины недопустима.

Подставив в формулу (1) результаты расчетов двух последних ступеней получили, что для тихоходной ступени условный коэффициент эрозии $E_y = 0,201$, а для быстроходной $E_y = 0,335$, т.е. более чем в полтора раза выше. При этом оба значения условного коэффициента эрозии меньше $E_y < 2$, значит имеет место незначительная эрозия и надежная работа турбины.

Эти значения получены для номинального режима работы, но известно, что при работе на частичных режимах темп эрозии рабочих лопаток возрастает вследствие образования возвратных течений на периферии [1]. Такую оценку еще предстоит выполнить в продолжении данной работы.

Литература

1. Филаретов П.М., Дебринов Г.А. Профилактика эрозии рабочих лопаток последних ступеней действующих паровых турбин // Энергетик. 2022. № 8. С. 3–13.

И.В. Бакурин, студ.; рук. В.В. Попов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МАЛОРАЗМЕРНОГО ТРД

Важным условием по обеспечению технологической независимости Российской Федерации является создание конкурентоспособной гражданской авиации. Одним из самых бурно развивающихся секторов гражданской авиации являются беспилотные летательные аппараты. Силовой установкой таких аппаратов являются малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД).

Наиболее распространённой схемой среди МГТД в классе тяги 40 кгс является облик турбореактивного двигателя (ТРД). В ТРД реализуется простейшая схема среди схем ГТД. Состоит из одноступенчатого центробежного компрессора и одноступенчатой неохлаждаемой осевой ступени турбины. Срабатывание энергии происходит путем преобразования потенциальной энергии горячего газа в кинетическую энергию в реактивном сопле. Это приводит к истечению газа с высокой скоростью и формированию реактивной тяги.

Для получения повышенных параметров тяги двигателя при проектировании зачастую прибегают к значительному увеличению температуры газа на выходе из камеры сгорания. Температура газа для современных ТРД в классе тяги до 40 кгс достигает 1200–1300 К [1], что приводит к значительному снижению ресурса двигателя.

Увеличение тяги двигателя можно обеспечить за счет увеличения расхода воздуха. Целью работы является разработка компрессора для двигателя тягой 40 кгс с умеренной температурой газов перед турбиной не более 1150 К. Работа посвящена проектированию центробежного компрессора с степенью сжатия $\pi_k^* \leq 4$, и расходом не менее 0,65 кг/с.

В процессе работы выполнены: формирование технического облика ГТД, термодинамический расчет ГТД включая дроссельные, высотно-скоростные и климатические характеристики, конструктивная схема ГТД и аэродинамический проект ступени компрессора.

В рамках аэродинамического проекта ступени компрессора выполнен двумерный расчет компрессора, по результатам которого спроектирована проточная часть и спрофилированы лопатки, построена трехмерная модель ступени, и выполнен трехмерный газодинамический расчет ступени.

Литература

1. **В.А. Григорьев, В.С. Кузьмичев, В.А. Зрелов и др.** Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели. Самара: Издательство Самарского университета, 2021.

*М.А. Ковалева, студент;
рук. А.Н. Тугов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТКО

Создание котельной установки для сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО), которая удовлетворяет требованиям надежности и экологической безопасности, с одной стороны, а также энергетической эффективности и минимизации затрат на изготовление и ремонт, с другой стороны, является актуальной задачей.

Котельная установка — это комплекс технических устройств, включающих в себя котел и вспомогательное оборудование, прежде всего, применительно к ТКО, газоочистное. Разработанный в рамках данных исследований котел производительностью 25 т/ч по сжигаемым ТКО имеет многоходовую компоновку с горизонтальным конвективным газоходом и следующие параметры перегретого пара: давление — 3,9 МПа, температура — 400°C.

Результаты теплового расчета с использованием разработанной оригинальной модели котла в специализированной программе показал:

- Температура дымовых газов на выходе из топки — не менее 875°C, а время их пребывания в топке выше этой температуры — 2,97 с.
- Температура дымовых газов перед защитным испарителем составляет примерно 600°C.
- Температура дымовых перед горячей конвективной ступенью пароперегревателя — не более 570°C.
- Температура уходящих газов находится на уровне 190°C.

Таким образом, эксплуатационный режим котла удовлетворяет всем основным техническим требованиям, предъявляемым к оборудованию для термической переработки ТКО.

При проектировании котла выбрана такая конфигурация газоходов, которая позволяет обеспечить его ремонтпригодность с низкими капитальными затратами и обеспечить преимущественно поперечное обтекание конвективных поверхностей нагрева дымовыми газами с высоким коэффициентом теплоотдачи.

Для очистки дымовых газов с доведением выбросов загрязняющих веществ до нормируемых показателей выбран сорбционный метод: реактор в комбинации с рукавными фильтрами и с предварительным вводом в этот реактор щелочного реагента и активированного угля, а также оборудование для селективного некаталитического восстановления оксидов азота.

Личный вклад автора заключается в разработке некоторых элементов конструкции, создании модели котла, проведении расчетов и анализе их результатов.

*М.Е. Карелин, аспирант;
рук. В.А. Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

В настоящее время вопросы энергопотребления занимают центральное место в задачах повышения эффективности промышленных предприятий. Одним из перспективных направлений в этой области является применение установок на органическом цикле Ренкина (ОЦР), позволяющих утилизировать низкопотенциальную теплоту различных источников для выработки электроэнергии [1]. Несмотря на активное исследование и применение данной технологии за рубежом, ее потенциал в российских промышленных условиях остается нереализованным.

При проектировании установок на ОЦР важно уделять внимание выбору рабочего тела. Традиционный подход базируется на термодинамическом анализе. Однако практика показывает, что максимальный термодинамический КПД не всегда гарантирует экономическую привлекательность. Стремление к высоким термодинамическим показателям часто ведет к конструктивному усложнению установки и росту капитальных затрат.

Для решения указанной проблемы в работе проводится исследование, связанное с многокритериальной технико-экономической оптимизацией тепловой схемы подобной энергетической установки. В основе подхода лежит математическая модель, позволяющая определять оптимальные параметры цикла для различных рабочих тел с целью минимизации целевого экономического показателя. Такой комплексный подход позволяет проводить сравнение различных рабочих тел и конфигураций цикла не только по термодинамическим, но и по ключевым экономическим критериям. В работе учтена взаимосвязь термодинамических аспектов работы цикла и стоимости основного оборудования, в результате чего формируется набор технико-экономических показателей, служащих основой для оценки целесообразности и инвестиционной привлекательности проектов по утилизации тепла в промышленности.

Литература

1. **Гафуров А.М.** Перспективные области применения энергетических установок на низкокипящих рабочих телах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 25.

Икан Ли, студ.; рук. В.А. Тищенко, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОВАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ БАШЕННОГО ТИПА (CSP) И ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛА БРАЙТОНА НА СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ CO₂

Рост энергопотребления и экологические проблемы стимулируют развитие технологий возобновляемой энергетики. Тепловые солнечные электростанции башенного типа (CSP) являются перспективным направлением. По состоянию на конец 2024 года суммарная установленная мощность башенной CSP в Китае достигла 481 МВт [1].

В ходе данного исследования производилось определение базовых характеристик подобной электростанции мощностью 50 МВт. Выбрано оптимальное местоположение (г. Гуачжоу, Китай) с учетом солнечной активности. Определены ключевые параметры башенной двухконтурной CSP с контуром расплавленной высокотемпературной соли (60% NaNO₃ и 40% KNO₃) и пародинамическим на базе цикла Ренкина. Двухконтурная система позволяет аккумулировать солнечную энергию и обеспечить работу установки при полной нагрузке на протяжении 10 часов без Солнца.

В результате моделирования характеристик башенной CSP с использованием климатических данных NSRDB в программе System Advisor Model была определена конфигурация поля гелиостатов и рассчитаны характеристики выработки тепла первого контура. На основе архивных данных погоды и выработки построена и обучена прогнозная модель на базе нейронной сети LSTM, позволяющая моделировать мощность данного башенного CSP при различных погодных сценариях.

Учитывая расположение станции в засушливой пустынной местности, предложена замена цикла Ренкина циклом Брайтона с использованием рабочего тела CO₂ [2]. Проведен вариативный термодинамический расчет тепловой схемы с целью определения оптимальных параметров работы цикла. Разработана тепловая схема цикла с регенерацией тепла и промежуточным охлаждением в компрессоре. Термический КПД оптимизированного цикла достиг 39,7%.

Литература

1. **China Solar Thermal Alliance.** Blue Book of China's Concentrating Solar Power Industry 2024.
2. **Klaus Brun, Peter Friedman, Richard Dennis** Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles. Woodhead Publishing in energy, 2017.

К.Х. Ле, асп.; рук. М.Я. Иванов, д.ф.-т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ СОГЛАСОВАНИЯ ТУРБИНЫ И КОМПРЕССОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА АВИАЦИОННОГО ГТД

Классические уравнения Максвелла принципиально ограничены: они описывают только кинетическую часть энергии электромагнитной волны в записи $(\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2)/2$. Потенциальная энергия, связанная с продольной составляющей волны, при этом не учитывается, вследствие чего нарушается закон сохранения энергии и потока энергии электромагнитной волны.

В работе предложено решение данной проблемы на основе объединения подходов гидродинамики и электродинамики. Исходными послужили уравнения движения сжимаемого газа (Навье–Стокса) и уравнение неразрывности, которые были линеаризованы для малых возмущений. При этом поле скоростей представлено суммой потенциальной (продольной) и соленоидальной (поперечной) составляющих. Это приводит к двум отдельным волновым уравнениям — для продольных волн сжатия-разрежения и для поперечных волн сдвига, аналогичным уравнению Ляме в упругом теле. Далее, введя новые переменные для электрической и магнитной напряженности, масштабированные до размерности скорости [м/с], указанные волновые уравнения удастся переписать в виде системы первых производных. В результате получена расширенная система уравнений Максвелла, включающая продольные и поперечные компоненты возмущений. Учет продольных токов смещения и сжимаемости светонесущей среды позволяет восстановить энергетическую замкнутость уравнений поля.

Полученные результаты открывают широкие возможности практического использования. В частности, новая трактовка вакуума как сжимаемой среды и электромагнитных волн как продольно-поперечных возмущений может быть применена при анализе процессов в высокотемпературных газогенераторах авиационных газотурбинных двигателей. Единое описание тепловых (акустических) и световых волн обеспечивает более полный энергетический баланс в камерах сгорания, учитывая радиационный перенос энергии наравне с потоками массы и импульса. Это дает потенциал для повышения термогазодинамической эффективности ГТД и подсказки новых подходов к проектированию турбомашин с учетом волновых эффектов.

Литература

1. **Иванов М.Я.** Единая механика поля и вещества // Сетевое издание «Научные исследования XXI века» № 6 (32) 2024 г.

*А.М. Калачев, аспирант;
рук. М.Я. Иванов, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Сегодня в отрасли отечественного энергетического машиностроения стоит актуальная задача создания мобильных высокоэффективных газотурбинных установок. В связи с превышением по характеристикам зарубежных газотурбинных установок и постоянной зависимостью от импорта необходимо разработать и внедрить собственные газотурбинные установки, которые могут быть созданы на основе современных авиационных газогенераторов.

При этом адаптация высокотемпературных отечественных авиационных двигателей под стационарную ГТУ требует комплексного подхода, который включает в себя необходимость учитывать факторы, связанные с условиями эксплуатации будущей стационарной установки, систему охлаждения и управления всем агрегатом. Необходимо вносить конструкторские изменения в ключевые элементы проточной части: компрессора, камеры сгорания и турбины.

С целью внедрения и разработки новых стационарных газотурбинных установок проводится анализ и проектирование силовой турбины на основе отечественного авиационного газотурбинного двигателя с тягой свыше 10 тонн. Для получения требуемой мощности новой ГТУ был проведён термогазодинамический расчет, на основании которого спроектирована трехступенчатая свободная турбина, которая обеспечивает выходную мощность всей ГТУ в диапазоне 30–40 МВт. Основной задачей выступает профилирование лопаточных аппаратов, которые позволяют достичь внутреннего относительного КПД проточной части не ниже 85% при заданных эксплуатационных параметрах.

Литература

1. **Скубачевский Г.С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчёт деталей. М.: Машиностроение, 1974.
2. **Рыбаков В.Н.** Методы и автоматизированные средства выбора рациональных параметров рабочего процесса унифицированного газогенератора и семейства газотурбинных двигателей, создаваемых на его базе: автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. техн. наук. Самара, 2013.

М.С. Кузнецов, студ.; рук. В.В. Попов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ОСЕВОЙ НЕОХЛАЖДАЕМОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МАЛОРАЗМЕРНОГО ТРД

Одним из направлений, позволяющих технологически развиваться Российской Федерации и быть конкурентоспособной на мировой арене, является авиация, в частности гражданская авиация. В настоящее время идет активное развитие беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения и самолетов малой гражданской авиации. Силовой установкой для агрегатов этой области является малоразмерный газотурбинный двигатель (МГТД).

Наиболее распространенной схемой среди МГТД является облик турбореактивного двигателя. Среди производителей широко представлены двигатели в классе тяги 50 кгс, тем не менее обладающие неудовлетворительными габаритными показателями и ресурсом для применения в качестве силовой установки беспилотного летательного аппарата.

Наиболее часто МГТД состоят из: центробежного компрессора, кольцевой камеры сгорания, одноступенчатой неохлаждаемой осевой турбины, представляющей собой моноколесо.

Для достижения высоких значений тяги и сохранения небольших размеров двигателя, необходимы высокие значения температуры на входе в турбину, однако это приводит к значительному снижению ресурса. Для класса тяги 50 кгс диапазон температур на выходе из КС составляет 1100–1250 К [1].

Целью работы является разработка осевой неохлаждаемой турбины для МГТД тягой 50 кгс с температурой газа перед турбиной не менее 1250 К с ресурсом не менее 500 циклов.

В процессе работы выполнены: формирование технического облика ГТД, термодинамический расчет ГТД включая дроссельные, высотно-скоростные и климатические характеристики, конструктивная схема ГТД для определения требований к турбине; аэродинамический и прочностной проект ступени осевой турбины.

В рамках проекта ступени осевой турбины выполнен двумерный расчет турбины, спроектированы лопатки, построена трехмерная модель ступени, и выполнен трехмерный расчет газодинамики и напряженно-деформируемого состояния.

Литература

1. **В.А. Григорьев, В.С. Кузьмичев, В.А. Зрелов и др.** Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели. Самара: Издательство Самарского университета, 2021.

В.А. Бернацкий, студ.;
рук-ли В.А. Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»),
И.Ю. Гаврилов, к.т.н., вед. инженер (ООО «Сайберфизикс»)

ДЕТЕКТОР АНОМАЛИЙ ПУСКОВ ГТУ НА ОСНОВЕСVAE

Пуск газотурбинных установок представляет собой критически важный процесс, характеризующийся сложными термодинамическими и механическими изменениями параметров. Детекция аномалий имеет особое значение, поскольку позволяет выявлять зарождающиеся дефекты на ранних стадиях, оптимизировать режимы наладки оборудования и оказывает влияние на предотвращение аварийных остановов.

Работа с архивными данными и применение интеллектуальных методов мониторинга открывают новые возможности для инженеров-наладчиков ГТУ: анализ исторических пусковых последовательностей позволяет выявить закономерности нормального поведения и определить характерные отклонения, связанные с деградацией компонентов или нарушениями эксплуатационных режимов. Это критически важно для обеспечения безопасной, надёжной и экономически эффективной эксплуатации энергетического оборудования.

В работе предложен подход, основанный на нейронной сети с архитектурой условного вариационного автокодировщика (CVAE) [1]. В отличие от обычного AE, вариационный AE не выдает единственное детерминированное значение для параметров пуска, а моделирует распределение в латентном пространстве. Условность позволяет рассматривать данные, как зависящие от внешних условий, таких как: параметры наружного воздуха, состояние турбины перед пуском и других, которые требуются для определенного узла. На вход кодировщику подаются заранее обработанные окна, которые проходят через слои, учитывающие временные зависимости в данных и на выходе рассчитываются параметры нормального распределения для скрытого состояния. Далее скрытое состояние передается в декодер, который реконструирует данные до размерности входных окон.

Полученная нейронная сеть позволяет сделать вывод об отклонении текущего пуска от нормального сравнивая изначальные входные данные с реконструированными, чтобы позволяет быстро анализировать пуск и находить причины отклонений.

Литература

1. **Sohn K., Lee H., Yan X.** Learning Structured Output Representation using Deep Conditional Generative Models.: NIPS, 2015.

А.С. Родькин, асп.; рук. В.Г. Грибин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КОНТРОЛЬ ВАКУУМА В КОНДЕНСАТОРАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ И ПЕРВИЧНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Эффективность работы конденсационных установок оказывает определяющее влияние на КПД паротурбинного энергоблока. Существующая практика эксплуатации, опирающаяся на статические нормативные характеристики и регламентные графики обслуживания, зачастую не обеспечивает поддержание оптимального вакуума в условиях переменных режимов и естественного износа оборудования, что влечет за собой существенные экономические потери. В настоящей работе предлагается методика повышения эффективности ПТУ, в основе которой лежит внедрение «цифрового двойника» конденсатора — математической модели, рассчитывающей норматив давления для текущих граничных условий (расхода пара, температуры и расхода охлаждающей воды) [1].

Функционирование разработанного программного алгоритма базируется на сравнении фактических и модельных параметров. Это позволяет не только фиксировать отклонения, но и с помощью анализа вторичных признаков (температурного напора, переохлаждения конденсата, концентрации кислорода) дифференцировать причины ухудшения вакуума, разделяя вклад загрязнения теплообменной поверхности и присосов воздуха.

Ключевой особенностью подхода является возможность количественной оценки влияния выявленного дефекта на энергоэффективность блока. Система конвертирует отклонение давления в величину недовыработки электрической мощности, предоставляя объективный критерий для принятия решений. Таким образом, в перспективе внедрение разработанного инструментария на ТЭС может обеспечить переход от интуитивного управления и поиска неисправностей методом перебора к эксплуатации, основанной на верифицированных данных и точной локализации дефектов.

Литература

1. Современная ситуация и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС: учебное пособие / Ю.М. Бродов [и др.]; под общей редакцией Ю.М. Бродова. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. — 104 с.

А.В. Лукьянов асп.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ОБОГРЕВАЕМОЙ ТРУБЕ

Полученные при расчетах циркуляции средние значения расчетных напоров и расходов воды a , следовательно, и скоростей циркуляции в каждом контуре являются важными характеристиками. Но сами по себе эти характеристики еще не определяют надежность работы циркуляционного контура. Они лишь позволяют произвести проверку ряда положений и критериев, которые определяют надежность работы котла и его отдельных контуров [1].

К критериям надежности работы циркуляционного контура относят [3]:

- отсутствие застоя и опрокидывания циркуляции
- отсутствие нарушений нормальной работы опускных звеньев, каждого контура
- обеспечение надежной циркуляции при нестационарных режимах
- допустимые температурные режимы обогреваемых участков контуров

Однако все описанные выше критерии требуют проведения трудоемких расчетов циркуляции, и не позволяют оценить совершенство конструкции испарительной системы котла в целом. К тому же, для определения критериев застоя и опрокидывания в НГР выполняется по номограммам, основанным на большом количестве экспериментальных данных, однако некоторые вопросы необходимо уточнить [2].

В рамках данной работы был получен ряд критериев, позволяющих оценить совершенство конструкции испарительной системы котельного агрегата, и определить соответствие предложенной конструкции некоторым критериям надежной работы, без проведения полных расчетов циркуляции.

Литература

1. **Лебедев И.К.** Гидродинамика паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. **Балдина О.М.** О расчете напорных паросодержаний в вертикальных испарительных и пароотводящих трубах паровых котлов // Теплоэнергетика. 2000. № 8. С. 26–29.
3. **Локшин В.А.** Гидравлический расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). М.: Энергия, 1978.

*Т.М. Володина, студент;
рук. А.А. Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ТЭЦ МЭИ ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

В настоящее время ТЭЦ МЭИ реконструируется и основным нововведением станет реализация парогазовой установки (ПГУ) совместно с уже существующим циклом Ренкина (ПСУ).

Было принято решение в тепловой схеме станции сделать общими для обоих циклов следующие элементы: деаэратор, градирни, коллектор охлаждающей воды, коллектор питательной воды, коллектор пара 0.5–0.6 МПа, коллектор перегретого пара.

ПГУ, работающая по циклу Брайтона-Ренкина [1], будет состоять из: газотурбинной установки GPB80D ($N_g = 7.81$ МВт, КПД = 33.6%); паровой турбины № 3 П-2.5/10.5-3.8/0.5 КТЗ ($n = 7500$ об/мин, $N_0 = 970$ кВт, $N_{\max} = 2500$ кВт, $G_0 = 18$ т/ч, $G_{\text{отб}} = 10$ т/ч, $P_0 = 3.9$ МПа, $t_0 = 440$ °С); конденсатора турбины №3; вертикального парового котла-утилизатора КГТ-12-3.9-440-2 ($D = 12$ т/ч). Из пароперегревателя пар поступает в турбину № 3, расширяется и следует в конденсатор, далее, после деаэратора, попадает в котел-утилизатор, где последовательно проходит экономайзер, двухступенчатый испаритель и пароперегреватель. На выходе уходящих газов из КУ предусмотрена установка газового подогревателя сетевой воды.

По методике, изложенной в источниках [1, 2], были проведены расчетные исследования блока ПГУ для двух режимов работы (конденсационного и теплофикационного), на основании которых получен ряд значений. Мощность установки на теплофикационном режиме будет равняться — 8.35 МВт, а на конденсационном — 9.94 МВт. КПД блока составит 44.1% на конденсационном и 37.1% на теплофикационном режиме. Котел-утилизатор, при работе с включенным ГПСВ, будет иметь КПД 78.7 % и температуру уходящих газов 110.8 °С. По результатам расчета расход пара в голову турбины составит 2.7 кг/с, что отличается от нормативного значения, которое составляет 5 кг/с. Сниженный расход уходящих газов после газовой турбины приводит к тому, что паровая турбина №3 работает в режиме с частичной нагрузкой.

Результаты, полученные из расчета тепловой схемы ТЭЦ МЭИ, были в дальнейшем использованы для создания лабораторной работы по курсу «Паровые и газовые турбины электростанций».

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов: М.: Издательский дом МЭИ, 3-е изд. перераб. и доп., 2017. — 675 с.
2. **Трухний А.Д., Романюк А.А.** Расчет тепловых схем утилизационных парогазовых установок: Издательский дом МЭИ, 2006. — 40 с.

*В.С. Киреенко, асп. (ВТИ);
рук. А.Н. Тугов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СНКВ В КОТЛАХ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТКО

Снижение выбросов оксидов азота (NO_x) до нормируемых показателей при сжигании твердых коммунальных отходов (ТКО) является весьма важной и актуальной задачей. В котлах для термической переработки ТКО наибольшее распространение в мире получила технология селективного некаталитического восстановления NO_x (СНКВ). Данная технология применена и на строящихся в Московской области заводах для сжигания ТКО, где в качестве восстановителя используется водный раствор карбамида [1]. Его подача осуществляется сжатым воздухом через форсунки, установленные на боковых и фронтальном экранах топочной камеры. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы СНКВ, является эффективное смешение восстановителя и дымовых газов. Представлены результаты численных исследований по оценке влияния конструктивного исполнения системы подачи реагента в топку котла и эксплуатационных факторов, таких как расход воздуха и концентрация реагента в водном растворе, на процессы распыла и смешения водного раствора карбамида с дымовыми газами. В качестве исходных данных для математического моделирования выбраны условия, приведенные в [1, 2]. Полученные результаты будут использованы при проведении режимно-наладочных мероприятий на московских заводах, а также при проектировании аналогичных систем СНКВ на других объектах для термической переработки ТКО с целью оптимизации их работы.

Литература

1. **Киреенко В.С., Тугов А.Н., Безруков В.А.** Система селективного некаталитического восстановления NO_x на заводах по энергетической утилизации ТКО в Московской области: обоснование принятых решений // Теплоэнергетика. — 2025. — № 9. — С. 94–102.
2. **Киреенко В.С., Тугов А.Н., Строков А.А.** Особенности применения технологии селективного некаталитического восстановления NO_x на заводах для энергетической утилизации ТКО в Московской области // IV Международная научно-техническая конференция «Экология в энергетике»: сборник докладов. — 19 сентября 2025 г. — С. 113–120.

*Н.А. Фокичева, асп.; рук. Е.Ю. Семакина, д.т.н., доц.
(ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург)*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО ТРАКТА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ АЭС

Доклад посвящен исследованию процессов аэродинамики в выходном тракте цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины, работающей в составе атомной электростанции (АЭС), с помощью численного моделирования и модельного эксперимента.

Известно, что выходное устройство турбины (например, диффузор) может повысить её мощность за счет увеличения перепада энтальпий, приходящегося на последнюю ступень [1]. Это широко апробировано на газовых турбинах, предназначенных для эксплуатации в составе комбинированных (парогазовых) установок.

Для паровых турбин АЭС совершенствование выходного тракта каждого цилиндра может стать оптимальным методом увеличения мощности по причине невозможности повышения начальных параметров пара из-за ограничений, связанных с материалами ядерного реактора, и расхода пара ввиду предельной длины рабочей лопатки последней ступени.

За объект исследования был принят блок «последняя ступень ЦВД — выходной тракт», в который входят: 1) Сопловой аппарат последней ступени турбины; 2) Рабочее колесо последней ступени турбины; 3) Выходной патрубок; 4) Паропроводы.

Численное CFD-моделирование проводилось в программном пакете Ansys Workbench с помощью модуля CFX. Модельный эксперимент проводился на базе стенда ЭТ4 кафедры турбиностроения имени И.И. Кириллова в ФГАОУ ВО СПбПУ.

Уровень потерь полного давления в блоке, как по результатам численного моделирования, так и по результатам эксперимента, показал необходимость в совершенствовании выходного тракта турбины, т.е. изменении его конструкции. Варианты улучшенных конструкций выходного тракта турбины АЭС будут в дальнейшем исследованы численным методом в лаборатории турбиностроения им. И.И. Кириллова.

Литература

1. **Лапшин К.Л.** Теория турбомашин: конспект лекций. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.

Д.Б. Шарафеев, студ.; рук. В.А. Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ МЭИ)

РАЗРАБОТКА ПРЕДИКТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Повышение надежности энергетического оборудования является одной из ключевых задач современной теплоэнергетики. В процессе эксплуатации паровых турбин их характеристики могут ухудшаться из-за различных процессов. Эти процессы приводят к уменьшению проходных сечений, росту гидравлических потерь и снижению КПД, создавая риск аварийных ситуаций. Традиционные физико-математические модели для диагностики состояния турбин требуют точных знаний о конструктивных особенностях оборудования, которые зачастую труднодоступны. Это ограничивает их применение для оперативного анализа. В связи с этим актуальной задачей является разработка альтернативных методов, позволяющих с высокой точностью оценивать ключевые параметры работы турбины на основе доступных данных технологических измерений.

В качестве решения предложена предиктивная модель на основе полносвязной нейронной сети. Для обучения модели использовался датасет, сформированный из данных АСУ ТП. Целевыми характеристиками, прогнозируемыми моделью, являлись давление и температура пара в поворотной камере (после камеры смешения). Их значения чувствительны к изменению состояния проточной части. Для валидации результатов была дополнительно разработана физико-математическая модель на базе модифицированного уравнения Стодолы-Флюгеля с эмпирическими коэффициентами, учитывающими гидравлические потери. Обученная нейронная сеть продемонстрировала высокую точность прогнозирования. Сравнение с физико-математической моделью показало существенное преимущество нейронной сети. Проведенное исследование показывает, что предиктивные модели на основе нейронных сетей являются высокоэффективным инструментом для мониторинга состояния проточной части паровых турбин. Ключевое преимущество подхода заключается в его способности обеспечивать высокую точность прогнозирования без необходимости наличия детальной конструкторской документации на оборудование.

Литература

1. **Платформа CyberStudio:** [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberphysics.xyz/cyberstudio>.

М.С. Быков, студ.; рук. В.В. Попов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА И ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ВЕНТИЛЯТОРА С РЕДУКТОРОМ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ТРДД

Принимая во внимание огромные пространства нашей страны и труднодоступность многих пунктов назначения, одной из важных отраслей авиации является малая авиация.

Силовой установкой для агрегатов малой авиации чаще всего является малоразмерный газотурбинный двигатель (МГТД). На данный момент, наиболее распространенной схемой МГТД является турбореактивный двигатель (ТРД).

Данная работа посвящена улучшению экономичности и технических характеристик ТРД посредством внедрения в схему ступени вентилятора, взаимодействующей с валом двигателя через редуктор, и оптимизации геометрического обвода воздухозаборника и осевого обтекателя.

Для повышения экономичности и тяговой эффективности, в двигатель вводится второй контур, благодаря ему создается дополнительная тяга и улучшается охлаждение горячих частей двигателя. Это позволит превратить ТРД в турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), который из-за наличия внешнего контура опережает ТРД по вышеописанным техническим характеристикам [1].

Вентилятор подобран исходя из следующих показателей: мощность, которую придется затратить на вращение вентилятора, предельная пропускная способность воздухозаборника и оптимальное передаточное число редуктора для лапачного взаимодействия двигателя и вентилятора.

Главное преимущество такого нововведения состоит в том, что такая компоновка воздухозаборника и вентилятора может быть взята за основу при создании других двигателей в классе тяги 40 кгс [2]. Помимо повышения экономичности и надежности двигателя данный узел может быть использован в серийном производстве.

В результате работы был выбран оптимальный технический облик ступени вентилятора и проведен двумерный аэродинамический расчет, создана трехмерная модель лопатки вентилятора и выполнен трехмерный расчет газодинамики каналов воздухозаборника и ступени вентилятора.

Литература

1. **Григорьев В.А.** Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели. УП.: Самарский университет, 2021.
2. **Ремчуков С.С.** Разработка перспективного малоразмерного турбовентиляторного реактивного двигателя на основе базового газогенератора // ИВУЗ. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 69–75.

Д.Г. Соколов, асп., рук. В.А. Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ ПОТОКОВ В ТУРБОМАШИНАХ

Исследование влажно-паровых потоков в последних ступенях паровых турбин критически важно для анализа эрозионного износа лопаток и потерь КПД. Традиционные методы лазерной диагностики (Particle Tracking Velocimetry, PTV) сталкиваются с проблемами низкого контраста изображений, засветок и артефактов от водяных пленок, что требует длительной и сложной обработки.

Разработана сверточная нейронная сеть архитектуры «encoder-decoder» для детектирования капель на изображениях, полученных с помощью лазерной диагностической системы «Полис» [1]. Нейронная сеть преобразует зашумленные исходные изображения в бинарные маски, точно определяя координаты капель и эффективно устраняя оптические шумы.

Проведено сравнение эффективности обработки экспериментальных данных посредством нейронной сети и традиционного подхода.

Новый подход сократил время обработки 1000 серий снимков с ~30 часов до 20 минут, что в 90 раз быстрее традиционных методов.

Нейросеть обеспечила более точное определение параметров капель, позволив четко разделить кинематические спектры первичных и вторичных капель в сложных зонах течения (например, в пристеночных областях и «фонтане» вторичной влаги), где классический метод давал физически некорректные результаты (например, скорости свыше 300 м/с).

Метод сохраняет физическую корректность картины течения без генерации артефактов и не требует дополнительной трудоемкой пост-обработки.

Применение предложенного нейросетевого подхода позволяет значительно повысить скорость, точность и надежность обработки экспериментальных данных о влажно-паровых потоках в турбомашинах, открывая новые возможности для детального анализа эрозионно-опасных частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) по гранту № 23-19-00445.

Литература

1. **Tishchenko V.A., Tishchenko A.A. et al.** Experience in applying laser diagnostic systems for experimental investigation of wet-steam flows in turbomachinery flow paths... Thermal Engineering. 2024. Vol. 71. No. 5. Pp. 57–73.

Г.Э. Добрынин, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ МЭИ)

РАЗРАБОТКА ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ПАРОВПУСКА



Рис. 1. 3D модель разработанного тангенциального паровпуска

Разработка тангенциального подвода для первой ступени цилиндра высокого давления паровой турбины направлена на создание конструкции, обеспечивающей равномерное поле скоростей на входе в ступень и минимизацию гидродинамических потерь.

Расчет геометрии суживающегося канала ведется согласно закону постоянства циркуляции $c_{\Gamma} \cdot r = \text{const}$ и на основании полученных геометрических характеристик поперечных сечений подвода на разных углах поворота строится 3D модель паровпуска.

Целью исследования является определение поля скоростей на выходе из тангенциального паровпуска, для определения равномерности подвода

пара к ступени. В качестве методов исследования применяется математическое моделирование течения потока пара в проточной части паровпуска.

При анализе полученных результатов, проводятся сравнения с традиционными решениями по конструкциям систем дроссельного парораспределения. В этом контексте тангенциальный подвод пара представляет собой компактное и универсальное для разных типов корпусов решение (рис. 1.), позволяющее избежать образования застойных зон и, обеспечивающее равномерное распределение рабочего тела перед первой ступенью паровой турбины.

А.А. Горбунов*, асп.; А.А. Чубаров*, инженер;
рук. А.Ю. Рябчиков**, д.т.н., проф.
(*АО «УТЗ», **УрФУ, г. Екатеринбург)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНЫХ ПУЧКОВ

Эффективность паротурбинной установки в значительной степени определяется давлением в конденсаторе. Определение оптимального расчетного давления в конденсаторе выполняется путем проведения теплогидравлических расчетов.

Тепловой и гидравлический расчеты конденсатора проводятся совместно, поскольку ключевые параметры для расчета взаимосвязаны и влияют друг на друга. Конечный результат проведения теплогидравлических расчетов представляет собой определение оптимальной величины площади теплообмена конденсатора, необходимой для обеспечения расчетного давления в конденсаторе.

В работе представлен анализ параметров, определяющих тепловые и гидравлические характеристики конденсаторов паровых турбин. Приведены необходимые данные для расчёта тепловых характеристик, включая геометрические параметры трубных пучков. Рассмотрены ограничения по длине конденсаторных труб и влияние геометрических параметров трубных пучков на гидравлическое сопротивление. Обоснован выбор средней скорости воды в трубах. Представлены ограничения, накладываемые на габариты корпуса конденсатора. Проанализирована зависимость удельной поверхности теплообмена от наружного диаметра труб. Приведены эскизы и описания трубных пучков серийных конденсаторов типов К-3100 и К-3650. Построены и проанализированы графики зависимости поверхности теплообмена от наружного диаметра труб, размещенных в корпусах конденсаторов. Сформулированы выводы о применении геометрических характеристик трубных пучков конденсаторов производства АО «УТЗ».

Литература

1. **Бродов Ю.М.** Конденсационные установки паровых турбин: [Учеб. пособие для вузов по направлению «Энергетика и энергомашиностроение» и спец. «Турбостроение»] / Ю.М. Бродов, Р.З. Савельев. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 287 с. ISBN 5-283-00162-8

Х. Аль-Аффи, асп.; рук. И.В. Шевченко, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВЕДУЩИХ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

В работе представлен сравнительный обзор современных газотурбинных двигателей (ГТД), разработанных в России, США, Великобритании и Китае. Анализ охватывает конструктивные особенности компрессоров, камер сгорания и турбин, а также ключевые эксплуатационные характеристики, включая тягу, степень двухконтурности, ресурс и температуру газа перед турбиной. Отмечено, что российские ГТД (АЛ-31Ф, РД-33, ПС-90А, ПД-14) отличаются работоспособностью в сложных условиях и высокой ремонтопригодностью. Американские двигатели (F110, F414, F135, F117) демонстрируют высокий уровень цифровизации, модульности и ресурса. Британские разработки Rolls-Royce (серия Trent, EJ200, Pearl 15, UltraFan) выделяются большой степенью двухконтурности и сниженным расходом топлива. Китайские ГТД (WS-10, WS-15, CJ-1000A) отражают быстрое развитие двигателестроения и стремление к технологической независимости.

Сравнительный анализ показывает, что повышение температур перед турбиной, использование композитов и внедрение цифровых систем управления определяют основные направления развития отрасли. Полученные результаты будут использованы при выборе прототипа двигателя, на основе которого будет спроектирована камера сгорания для дальнейших исследований и улучшения её рабочего процесса.

Литература

1. **Фалалеев С.В.** Конструкция ТРДДФ АЛ-31Ф [Электронный ресурс]. Самара, 2013.
2. **GE Aerospace. F110 Engine** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geaerospace.com/military-defense/engines/f110>.
3. **Rolls-Royce.** The UltraFan engine [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rolls-royce.com/innovation/ultrafan.aspx>

И.В. Ермакович, студ.; рук. Л.Е. Егорова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО УРОВНЯ ВОДЫ НА СЕПАРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000МКО

Парогенератор — однокорпусный рекуперативный теплообменный аппарат горизонтального типа с погруженной поверхностью теплообмена. Является составной частью главного циркуляционного контура и предназначен для выработки сухого насыщенного пара за счёт тепла, переносимого в парогенератор из активной зоны ядерного реактора теплоносителем первого контура.

Парогенератор ПГВ-1000МКО разработан применительно к реакторной установке тепловой мощностью 3300 МВт. Реакторная установка четырехпетлевая, номинальная мощность одного парогенератора 828 МВт.

Основные параметры парогенератора ПГВ-100МКО:

- давление генерируемого пара — 7 МПа;
- температура генерируемого пара — 285,8°С;
- температура питательной воды — 225°С;
- паропроизводительность — 1652 т/ч;
- потери давления по второму контуру — 0,15 МПа;
- давление теплоносителя на входе в парогенератор — 16,2 МПа.

При проведении расчёта сепарационных характеристик парогенератора определена расчетная высота парового пространства, состоящая из максимального действительного уровня воды над погруженным дырчатым листом и эффективной высоты парового пространства. С учётом того, что значения коэффициента остаточной неравномерности, массовый уровень воды, а также паросохранение в объёме парогенератора были приняты по референтным значениям ПГВ-1000МКП, необходимо уточнение данных значений. Оба парогенератора отличаются по мощности, геометрическим размерам корпуса и компоновке впускных устройств.

С учётом ввода в эксплуатацию парогенератора ПГВ-1000МКП будут проанализированы результаты сепарационных характеристик данного парогенератора и получены значения для вновь разрабатываемого ПГВ-1000МКО. В дальнейшем будет сделан прогноз о его сепарационных возможностях.

Личный вклад автора заключается в проведении расчёта осадительной сепарации, сбора и анализа информации по референтному парогенератору ПГВ-1000МКП.

*А.В. Лемешев, асп.; В.В. Гаврилов, начальник сектора (ЦИАМ);
рук. В.Г. Грибин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)»*

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В данной работе производится анализ тенденций развития вспомогательных газотурбинных двигателей и малоразмерных газотурбинных энергетических установок с целью дальнейшего выдвижения предположений, связанных с вопросом наиболее актуальных направлений развития отечественных установок данного целевого назначения, заключающегося в децентрализованном снабжении изолированных районов электроэнергией или же снабжение электроэнергией летательного аппарата, что накладывает, в свою очередь, жесткие, но, в то же время, противоречивые требования на применяемые установки.

Данные требования выражаются в следующем: малые габариты; требование высокой экономичности, достижение которой затруднено в силу применения малоомощных лопастных машин; простота конструкции, достижение которой осложняется применением развитых вспомогательных пневмо- гидросистем, и потенциальной перспективностью применения системы регенерации тепла в цикле, что могло бы помочь достичь высокой эффективности цикла.

В работах [1] и [2] выдвигаются утверждения, описывающие потенциально перспективные направления решений инженерно-технических задач, развитие которых в будущем может внести ценный вклад в развитие отечественных установок с подобным целевым назначением.

Литература

1. **Пономарев, Б.А.** Проблемы создания ВГТД с ротором на газовых подшипниках / Б.А. Пономарев, В.В. Гаврилов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2009. № 1(17).
2. **Темис, М.Ю.** Тенденции применения лепестковых газовых подшипников в опорах ГТУ и ГТД (обзор) / М.Ю. Темис, В.В. Гаврилов // Авиационные двигатели. 2020. № 1(6).

Х. Инь, асп.; рук. А. Ф. Медников, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ЛОПАТОЧНОЙ СТАЛИ С ПОКРЫТИЕМ

Разрушение рабочих лопаток паровых турбин вследствие коррозионно-усталостного воздействия по-прежнему относится к наиболее тяжелым и экономически затратным видам повреждений энергетического оборудования. Несмотря на значительный прогресс в понимании механизмов возникновения и развития усталостных трещин данная проблема остается до конца не решенной. Применение ионно-плазменных покрытий может быть эффективным методом борьбы с коррозионно-усталостным разрушением лопаток [1]. Тонкие (от 5 до 30 мкм) многослойные покрытия устраняют микродефекты и изолируют поверхность металла от воздействия коррозионно-активной среды, создавая в поверхностном слое сжимающие напряжения, эффективно противостоящие росту усталостных трещин.

В рамках данной работы представлены результаты исследований влияния ионно-плазменных покрытий на основе соединений хрома (Cr) и его карбида (CrC) на коррозионную стойкость и усталостные характеристики лопаточной стали 12X13. В результате выполненных исследований выявлено, что применение данных покрытий для стали 12X13 увеличивает предел выносливости на 25% (см. рис. 1) и повышает коррозионную стойкость не менее, чем в 2 раза.

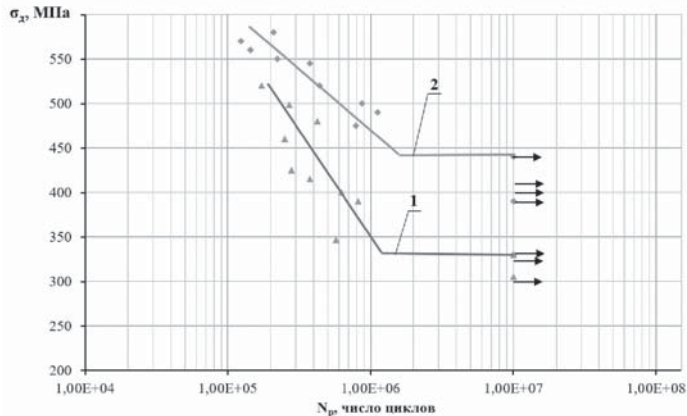


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний образцов стали 12X13 без покрытия (1) и с покрытием (2)

Литература

1. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Рыженков А.В., Качалин Г.В., Зилова О.С. Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 29.

*А.И. Куринной, студ.; рук. И.В. Будаков, к.т.н., доц.
(Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском)*

ПРЕИМУЩЕСТВО КРУГЛЫХ ВОЗДУХОВОДОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВОЗДУХОЗАБОРНЫХ ТРАКТАХ ГТУ

Проведён анализ эффективности применения воздухопроводов круглого сечения из композиционных материалов на основе полиэфирных смол в составе воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110. Показано, что при одинаковой площади проходного сечения (25 м^2) переход от прямоугольного или квадратного сечения к круглому позволяет снизить периметр на 20–35%, что напрямую уменьшает расход материала и массу конструкции. Расчёты аэродинамических потерь показали, что потеря полного давления в круглом воздуховоде ($D = 5,6 \text{ м}$) составляет 87,6 мПа при $Q_{\max} = 310 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда как в прямоугольном ($3,5 \times 7,14 \text{ м}$) — 175,0 мПа, что в 2 раза выше. Это приводит к дополнительной потере мощности до 12,6 кВт и недовыработке электроэнергии до 50 000 кВт·ч в год на один блок. 3D-моделирование выявило наличие застойных зон и пульсаций в углах прямоугольных сечений, отсутствующих в круглых. Применение композитов (стеклопластик) дополнительно снижает массу на 70% по сравнению с металлом, исключает коррозию и обеспечивает индекс звукоизоляции $R_w = 35\text{--}45 \text{ дБ}$. Предложено использовать крупноблочные воздухопроводы $D = 5,3 \text{ м}$, изготовленные методом намотки. Рекомендовано предпочтительно применять круглые сечения при реконструкции и строительстве ТЭС и ПГУ.

Литература

1. **Шейнман Е.В.** Заводское изготовление пылегазовоздухопроводов и трубопроводов низкого давления для тепловых электростанций. М.: Госиздат, 1963.
2. **Будаков И.В., Мурашов П.Н. и др.** ГТЭ-110: разработка и внедрение входной улитки из композиционных материалов // Турбины и Дизели. 2019.
3. **Будаков И.В., Буданов В.А.** Расчетно-аналитическое исследование воздухозаборного тракта ГТЭ-110 // Вестник ИГЭУ. 2015.
4. **Идельчик И.Е.** Справочник гидравлических сопротивлений. М.: 1992.
5. **Рихтер Л.А.** Газовоздушные тракты тепловых электростанций. М.: 1969.

К.А Сидоренко, асп.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НРЧ И ВРЧ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА ПП-2100/1780-25,4/4,4-571/570

В работе проведена оценка температурного режима нижней и верхней радиационных частей прямоточного котла НГ-2100/25,4-УМ16 (ПП-2100/1780-25,4/4,4-571/570) энергоблока 660 МВт. Исследование выполнено на основе адаптированных статической и динамической моделей, разработанных в программе Boiler Designer. Настройка динамической модели осуществлялась по данным реальных пусков, предоставленных специалистами Троицкой ГРЭС.

Рассматривались этапы выхода на прямоточный режим и работы на нагрузке 30% BMCR, а также номинальный режим. Выполнены расчёты температур металла труб навивки Рамзина и экранов Бенсона в НРЧ и ВРЧ. Оценка велась по критерию предельной температуры наружной стенки трубы [тст.н]. Для стали 12Х1МФ принята допустимая температура 585 °С.

Показано, что навивка Рамзина характеризуется меньшей теплонапряжённостью, чем экраны Бенсона, для которых максимальная температура наружной поверхности достигает ~580 °С. Рост неравномерности тепловосприятия приводит к увеличению температуры металла на 20%. При этом во всех рассмотренных режимах температура стенки остаётся ниже предельного значения, что исключает риск окалинообразования.

Дополнительно выполнена проверка разницы температур сред в смежных панелях НРЧ для схем с 6 и 8 панелями. В обоих вариантах разница температур не превышает 50 °С, что соответствует существующим рекомендациям.

Полученные результаты демонстрируют, что исследованные конструктивные схемы обеспечивают надёжные тепловые условия работы НРЧ и ВРЧ прямоточного котла в пусковых и номинальном режимах.

Литература

1. **В.М. Супранов, К.А. Плешанов, М.Н. Зайченко, К.В. Стерхов, Д.А. Хохлов, Д.С. Ткаченко** / МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПУСКА КОТЛА ЭНЕРГОБЛОКА 660 МВт ТРОИЦКОЙ ГРЭС БЕЗ ПУСКОВОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА И ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НРЧ И ВРЧ / Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”/Теплоэнергетика 2023, № 2.
2. **Балдина О.М., Локшин В.А., Петерсон Д.Ф. и др.; Под ред. В.А. Локшина и др.** / Гидравлический расчет котельных агрегатов: (Нормативный метод) — М.: Энергия, 1978.
3. **Дорожук В.Е., Рубин В.Б.** Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. Создание и освоение. — М.: Энергия, 1979.

А.С. Власюк, студ.; рук. А.Ф. Медников, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ОТ КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ

Актуальная проблема пассивной защиты рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин от каплеударной эрозии может быть решена за счет формирования комбинации диффузионных и конденсационных функционально-градиентных покрытий, обладающих различными требуемыми свойствами по глубине модифицированного слоя поверхности.

Результаты проведенных в МЭИ испытаний показали, что конденсационные многослойные ионно-плазменные покрытия на основе соединений хрома и его карбидов и нитридов не менее, чем в 2–3 раза повышают эрозионную и коррозионную стойкость лопаточных материалов [1] при положительном влиянии на их усталостные характеристики [2], а диффузионные покрытия на основе азотирования позволяют увеличить эрозионную стойкость стеллита в 1,5–2 раза [3].

Проведённый аналитический обзор показал, что для определения эффективности реализации предлагаемого решения необходимо:

- 1) разработать модель системы «функционально градиентное покрытие-материал», что позволит определить оптимальные характеристики и требования к комбинационным покрытиям при близких к эксплуатационным условиях воздействия рабочей среды;
- 2) провести параметрические исследования по определению закономерностей износа стеллитовых пластин с функционально градиентными ионно-плазменными покрытиями. Выявленные характеристики износа стеллита и режимные параметры формирования покрытий, могут быть впоследствии использованы при разработке эффективного способа защиты рабочих лопаток паровых турбин от каплеударной эрозии.

Литература

1. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Рыженков А.В., Качалин Г.В., Зилова О.С. Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 29.
2. Качалин Г.В., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б., Аркадьев Д.А., Темкин С.Г., Сенина Н.А. Результаты усталостных испытаний стальных рабочих лопаток паровой турбины К-25-0.6 геос с ионно-плазменным покрытием Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 18–22.
3. Ryzhenkov A.V., Mednikov A.I., Tkhabisimov A.B., Kachalin G.V. Effect of ion nitriding on the erosion resistance of blade steels and stellite. Eurasia J Biosci (2020) 14: 6075–6080.

*А.Ю. Кузьмин, студ.;
рук. Д.Н. Курицын к.т.н., доцент (МАИ, Москва)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Защитные покрытия деталей играют ключевую роль в обеспечении долговечности и надежности деталей, подверженных высоким температурам, коррозии, эрозии и высоким механическим нагрузкам. В последние годы тема восстановления защитных покрытий особо актуальна в отечественной энергетике из-за ограниченного доступа к новым деталям. Традиционные методы восстановления покрытий, такие как ручное нанесение или полуавтоматизированные процессы, имеют ограничения по точности, повторяемости и безопасности. В последние годы промышленные роботы стали перспективным инструментом для оптимизации этих процессов. Доклад посвящен анализу их использования.

В работе проведен обзор технологий роботизированного восстановления покрытий. Промышленные роботы применяются для различных методов нанесения защитных покрытий: плазменное напыление (APS), высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF), лазерное наплавление и электрохимическое осаждение. Роботы, такие как ABB IRB или Fanuc, оснащенные специализированным инструментом, обеспечивают автоматизированное удаление старого покрытия и нанесение нового. Интеграция с системами машинного зрения позволяет детектировать дефекты с точностью до микронов. В анализе рассмотрены кейсы из практики: использование роботов в ремонте двигателей GE Aviation и Rolls-Royce, где автоматизация сократила время цикла на 30–50%.

Выявлены преимущества использования роботов. Автоматизация повышает точность нанесения покрытий, минимизируя человеческий фактор и обеспечивая равномерность слоя. Экономическая эффективность проявляется в снижении брака, уменьшении расхода материалов и повышении производительности. Кроме того, они позволяют работать в опасных средах, защищая операторов от токсичных паров и высоких температур.

Литература

1. **Аэрокосмическое производство с роботами** // Industry Insights: Aerospace Manufacturing on Board with Robots. — Robotic Industries Association, 2023. — URL: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/aerospace-manufacturing-on-board-with-robots> (дара обращения: 23.09.2025).

А.Г. Кружалов, асп.;
рук. М.В. Силуянова, д.т.н., проф. (МАИ г. Москва)

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОНОКОЛЁС ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Актуальность проблемы обусловлена ужесточением требований к авиационным газотурбинным двигателям, а также отсутствием потенциала модернизации традиционных роторов что стимулирует переход к биметаллическим моноколам (блискам) [1, 2]. В условиях многофакторности и неопределенности выбора технологий изготовления блисков экспертные методы приобретают особую значимость [3].

Новизна исследований заключается в применении экспертных методов для комплексной оценки технологии горячего изостатического прессования (ГИП) в создании блисков с охлаждаемыми лопатками. Разработан алгоритм экспертизы, включающий формирование комиссии, определение критериев значимости, интегральную оценку альтернатив и анализ согласованности мнений. ГИП выделен как оптимальный вариант.

Личный вклад автора состоит в организации экспертной комиссии, разработке комплекса критериев оценки и их значимости, поиске альтернативных технологий, проведении интегральной оценки с ранжированием вариантов, расчете конкордации для анализа расхождений, а также оценке точности и воспроизводимости результатов. Обоснованы преимущества ГИП и ограничения для неразъемного соединения лопаток с диском, что способствует формализации экспертного опыта и снижению затрат на научно-исследовательские работы.

Литература

1. **Кружалов А.Г.** Разработка конструкции и технологии производства отечественных биметаллических турбин // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. М, 2020. № 1. С.35–39.
2. **Оспенникова, О.Г.** Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов / О.Г. Оспенникова, В.И. Лукин, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, И.А. Галушка, О.В. Шевченко, Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 144–158.
3. **Саати Томас Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Научн. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Изд. 3-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. — 360 с.

А.В. Самойлов, аспирант;

М.В. Силуянова, д.т.н., профессор (НИУ «МАИ», Москва)

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА ОТ ТОЛЩИНЫ ПРОФИЛЯ В АППАРАТЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАКРУТКИ

В современных двухконтурных газотурбинных двигателях эффективность охлаждения рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) напрямую определяет их ресурс и надёжность. Аппарат предварительной закрутки (АПЗ) предназначен для сообщения охлаждающему воздуху тангенциальной составляющей скорости, что снижает относительную скорость на входе в лопатку и повышает эффективность теплообмена. При этом геометрия профиля лопаток АПЗ, в частности его относительная толщина (d/c , где d — максимальная толщина профиля, c — хорда), оказывает решающее влияние на термодинамические параметры потока.

Авторами была создана математическая модель течения воздуха в АПЗ на основе уравнений сохранения расхода, импульса, энергии; зависимость ключевых термодинамических параметров охлаждающего воздуха (коэффициента потерь полного давления ζ , угла закрутки β , температуры торможения на выходе T^*_{*2}) от относительной толщины профиля лопаток АПЗ в диапазоне $d/c = 5\text{--}15\%$ [1, 2].

Исследование проводилось методом вычислительной газодинамики для трёхмерной секторной модели АПЗ с использованием модели турбулентности SST $k\text{--}\omega$. Вариативному анализу подвергалась относительная толщина профиля при постоянных значениях расхода воздуха, давления на входе и геометрических параметрах решетки (шаге, угле установки). Перспектива использования связана с внедрением в методику проектирования АПЗ для перспективных ГТД, что позволит снизить расход охлаждающего воздуха при сохранении требуемого теплового состояния рабочих лопаток ТВД.

Литература

1. **Силуянова М.В.** Исследование тепловых характеристик турбореактивных двигателей методом математического моделирования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2016 — № 1. — С. 57–68.
2. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст]. В 2-х томах / К. Флетчер. — М.: Мир, 1991. — 1056 с.

Секция 53
ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ, НАДЕЖНОСТИ
И КОНСТРУИРОВАНИЯ
Problems of technology, reliability,
and designing

Председатель секции: к.т.н., профессор Кузнецов Сергей Федорович

Секретарь секции: к.т.н. Шипков Андрей Анатольевич

*А.В. Селищев, И.В. Данилин, студ.;
рук. А.Ю. Марченков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Рост нагрузок в энергосистеме обуславливает ужесточение требований к высоковольтному оборудованию, особенно в части его надёжности и долговечности. Исследование физико-механических характеристик изоляционных материалов позволяет прогнозировать их старение и предотвращать эксплуатационные отказы. Одной из ключевых причин отказов, вызванных растрескиванием изоляции и потерей герметичности, является деградация физико-механических свойств изоляционных материалов под воздействием климатических и рабочих температур. Поэтому, наряду с электротехническими характеристиками, изоляционные материалы должны обладать и заданным уровнем характеристик прочности и устойчивости к механическим воздействиям, в том числе и при повышенных температурах, что приводит к необходимости оценки указанных параметров [1].

Настоящая работа посвящена исследованию свойств прочности RIP- и RIN-изоляций при различных видах нагружения — растяжении, статическом изгибе, ударном нагружении, при приложении локально действующей нагрузки. Исследования проведены в широком диапазоне климатических температур (от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$), а также при более высоких температурах (до $+120^{\circ}\text{C}$), которые могут возникать при аварийных режимах работы оборудования. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 5982. По полученным результатам механических испытаний, а также с использованием разработанного в МЭИ способа определена важная характеристика материалов RIP- и RIN-изоляций — температура стеклования. Показано, что RIN-изоляция обладает более стабильными механическими свойствами в широком температурном диапазоне.

Личный вклад авторов состоит в проведении механических испытаний и анализе результатов исследований.

Полученные результаты актуальны для более обоснованного выбора и расчетов на прочность конструкций высоковольтных вводов с учетом эксплуатационных воздействий.

Литература

1. Демидов А.Н., Каримбеков М.А., Марченков А.Ю., Матюнин В.М. Оперативная оценка температуры стеклования изоляционных материалов для высоковольтных вводов // Материаловедение. 2016. № 8. С. 11–15.

Д.Е. Егоров, студ.; рук. Е.В. Позняк д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛА С УЧЁТОМ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Цель исследования – разработка алгоритма численного моделирования параметров напряжённо-деформированного состояния объёмной модели тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) с крестообразным компенсатором с учётом внешних нагрузок, внутреннего энерговыделения, радиационного распухания топлива и ползучести.

Задачи исследования:

- 1) Математическая постановка нестационарной термомеханической задачи для ТВЭЛ в приращениях [1, 2] с учётом температурного воздействия, внешнего и внутреннего давления, ползучести и радиационного распухания.
- 2) Разработка итерационного алгоритма решения на каждом временном шаге, при котором расчёт температурного поля и полей приращений перемещений, деформаций и напряжений выполняется последовательно до достижения сходимости по приращениям деформаций и напряжений.
- 3) Создание расчётного кода на C++, реализующего алгоритм метода конечных элементов [3]. Код включает модули формирования матриц, сборки глобальных систем и решения систем линейных алгебраических уравнений методом сопряжённых градиентов.
- 4) Верификация путём сравнения результатов расчётов с решением, полученным в аттестованном программном комплексе “UZOR 1.0” (паспорт аттестации №346 от 28.11.2024).

Актуальность работы обусловлена развитием ядерных энергетических установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя, для которых важен точный прогноз прочности ТВЭЛов. Решение нелинейной задачи требует применения шаговых методов с учётом предыдущих состояний и предыстории нагружения.

Научная новизна состоит в разработке алгоритма решения термомеханической задачи в приращениях, адаптированного для моделирования ТВЭЛов с дисперсионным топливом, с учётом радиационного распухания топливной фазы и ползучести.

Литература

1. **К. Васидзу.** Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987.
2. **Термопрочность деталей машин.** Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. М.: «Машиностроение», 1975.
3. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

С.С. Швецов, студ.; рук. П.Ю. Петров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АНТИКОРРОЗИОННОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОГО ФЛЮСА ФЦК-18

В современной промышленности к конструкциям предъявляются требования к долговечности в агрессивных средах, которые обуславливают необходимость разработки методов защиты от коррозии [1]. Проблема коррозии остаётся одной из наиболее значимых для промышленного сектора. Экономические потери от коррозионного разрушения металлоконструкций составляют существенные доли ВВП развитых стран.

Электрошлаковая наплавка является эффективным методом восстановления и защиты ответственных элементов оборудования благодаря высокой производительности и минимальному проплавлению основного металла [2]. Важными шагами, которые обеспечат получение качественных соединений, являются правильный подбор режимов наплавки, а также правильный выбор материалов.

В данной работе, было проведено определение режимов наплавки, а также влияния перекрытия на характеристики наплавленных валиков, при использовании флюса ФЦК-18 (марка) и ленты Soudotape 625 (марка). Для поиска оптимального режима наплавки варьировались: сила тока (I) в интервале 600–750 А, напряжение на дуге (U) в интервале 24–28 В, скорость наплавки (V_n) в интервале 9,15–11 м/ч, вылет электрода в интервале 30–35 мм и высота засыпки флюса (h) в интервале 30–35 мм. В результате экспериментов, проведённых с участием автора, определены оптимальные режимы наплавки (сила тока (I) = 700–750 А, напряжение (U) = 24–26 В, скорость наплавки (V_n) = 9,5 м/ч, вылет электрода = 30–35 мм, высота засыпки флюса (h) = 35 мм), обеспечивающие необходимый химический состав, твёрдость, а также минимальное количество пор. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологии наплавки для ремонта, восстановления и/или изготовления энергетического оборудования. Установленные параметры обеспечивают формирование качественных антикоррозионных покрытий, с характеристиками удовлетворяющими требованиям.

Литература

1. Патон Б.Е., Лейко Б.И. Наплавка и напыление. Современные технологии и перспективы развития. М.: Машиностроение, 2010.
2. Фомин А.В., Лебедев В.А. Электрошлаковая наплавка в современном машиностроении. СПб.: Профессинал, 2010.

К.А. Заварин, студ.; рук. Е.В. Позняк, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР И РАСЧЕТ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ТВС

Цель исследования — разработка метода и программного кода на языке C++ для расчёта зазоров между соседними тепловыделяющими сборками (ТВС) в активной зоне реактора ВВЭР.

Задачи исследования:

- математическая постановка задачи о деформировании ТВС при неравномерном распределении температуры и флюенса нейтронов по сечению и деформациях ползучести [1]. Определение перемещений ТВС, температурных и радиационных моментов и продольных сил [2]. Определение прогибов методом начальных параметров. Сопоставление прогибов соседних ТВС и расчет их суммарного сближения;
- алгоритмизация метода и реализация решения в программных кодах на языке C++: разработка структуры программы с интерфейсом ввода исходных данных, решателем, выводом результатов в табличном и графическом виде;
- верификация разработанного решения путём сравнения результатов расчета частных подзадач с аналогичными расчётами в конечно-элементном программном комплексе.

Актуальность поставленной задачи обусловлена тем, что расчет формоизменения активной зоны является обязательным для обоснования безопасной эксплуатации АЭС.

При уменьшении зазора удельное количество теплоносителя между ТВС сокращается. Поскольку вода в реакторе выполняет функцию замедлителя нейтронов, то при уменьшении слоя скорость нейтронов возрастает. Увеличение скорости нейтронов приводит к ускоренной деградации материалов ТВС, что снижает их прочностные характеристики и устойчивость к внешним воздействиям. Кроме того, при больших прогибах возникает проблема не прохождения систем управления и защиты по соответствующим каналам внутри ТВС.

Научная новизна исследования заключается в разработке и применении нового подхода к данной задаче, а именно расчет прогибов аналитическим методом.

Литература

1. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М., Автомиздат, 1975, с. 280.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Г.С. Шапиро. — 2-е изд.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 560 с.

Н.А. Рахманова, студ.; рук. А.А. Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИЗГИБА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН

Работа заключается в исследовании влияния типа конечно-элементной сетки и размера элемента на результаты решения статических задач об изгибе прямоугольных пластин. Расчетная схема представляет собой шарниро-опертую по всем сторонам тонкую пластину, находящуюся под действием равномерно распределенной по поверхности нагрузки.

Цель работы — исследование влияния параметров конечно-элементной сетки на точность решения задачи изгиба пластины в различных программных комплексах и сходимость решения.

При выполнении работы рассматривается метод конечного элемента, как один из основных современных инструментов решения задач строительной механики. Для проведения исследования выбраны следующие программные комплексы: Логос — Прочность, CAE Fidesys, Zenit-95, Ansys, Stark ES. При решении задачи используются различные типы конечных элементов, реализованные в данных программных комплексах. Оценивается сходимость решения по максимальным значениям изгибающих моментов. Сравнение проводится при сопоставлении с аналитическими решениями задачи об изгибе пластин по классической теории Кирхгофа-Лява и теории Тимошенко, полученными путем разложения прогиба в тригонометрические ряды [3].

По результатам оценки сходимости предложены рекомендации по выбору типа конечно-элементной сетки и размера элемента. Также проведена оценка быстродействия вышеуказанных программных комплексов.

Результаты проведенной работы могут быть использованы специалистами для оптимизации выбора конечно-элементной сетки при решении аналогичных задач в области статических расчетов строительных конструкций.

Литература

1. **Перельмутер А.В.** Беседы о строительной механике, 2014
2. **Руководство пользователя CAE Fidesys [Электронный ресурс]** URL: <https://download.cae-fidesys.com/s/Fidesys-6-0-manual-rus>(дата обращения: 10.10.2025)
3. **Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.** Пластины и оболочки. — М.: Наука, 1966.

А.В. Дуб, студ.; рук. А.А.Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА РАЗВИТИЕ УТОНЕНИЙ И РЕСУРС ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

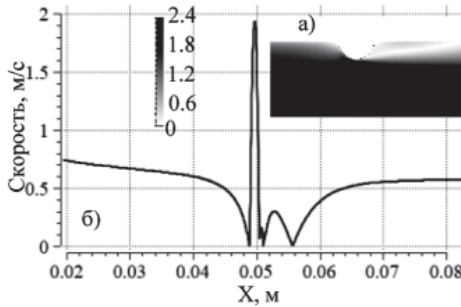


Рис. 1. Значения скоростей в пристенной области

В связи с увеличением нагрузок на трубопроводные системы, вызванного, в частности, вводом в эксплуатацию новых более мощных энергоблоков электростанций, для оценки надежности и безопасности их эксплуатации важным становится исследование влияния эрозионно — коррозионного воздействия среды и уточненная оценка ресурса их элементов.

Целью данной работы было усовершенствование существующего подхода к определению ресурса трубопроводных систем с дефектами типа утонений при воздействиях, возникающих вследствие влияния гидродинамики потока жидкости на металл вблизи корня сварного шва. Была использована зависимость, описывающая изменение геометрии в пристенной области $S=f(v, \epsilon)$, где S — интенсивность утонения металла, v , ϵ — скорость и кинетическая энергия турбулентности потока в пристенной зоне.

Задача моделирования реализована последовательностью следующих действий. 1) В результате решения двумерной задачи гидродинамики с помощью ANSYS FLUENT определяется поле скоростей однофазной водной среды в пристенной зоне. 2) На основе этих данных с использованием вышеприведенной формулы вычисляются значения утонений стенки трубопровода на заданном интервале времени. Геометрическая модель перестраивается и шаги 1) и 2) повторяются. Поле скоростей среды на первой итерации (а) и соответствующая эпюра скоростей в пристенной области (б) представлены на рисунке 1. Моделирование проводится с помощью комплекта скриптов на языке Python. Личный вклад автора состоит в осуществлении расчётов, их анализе и сопоставлении с ранее опубликованными данными [1] теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций по оптимизации проектирования и эксплуатации трубопроводных систем. Их применение позволит повысить надежность и долговечность работы элементов рабочего контура электростанций.

Литература

1. Sun L., Ding Y. Fluid-structure-interaction analysis for welded pipes with flow-accelerated corrosion wall thinning // Canadian Nuclear Laboratories, Chalk River, ON K0J 1J0, Canada. — 2016.

Д.Т. Саакян, студ.; рук. Е.В. Позняк, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ ТРЕЩИНЫ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКАЗА КОЛЛЕКТОРА ПАРОГЕНЕРАТОРА

В рамках исследовательской работы проводится оценка влияния модели трещины на результаты расчетов вероятности возникновения течи или разрыва перфорированной зоны корпуса коллектора первого контура водо-водяного энергетического реактора в течение срока эксплуатации [1, 2].

Задачи исследования:

1. Разработать методику расчета вероятности разрушения корпуса коллектора для случаев эллиптической, полуэллиптической и четвертьэллиптической моделей поверхностных трещин.
2. Разработать алгоритм численного решения поставленной задачи и расчетный модуль на языке программирования C++.
3. Выполнить расчеты, сравнить распределения вероятности возникновения течи, полученные для различных условных диаметров.
4. Верифицировать результаты расчетов путем сравнения с результатами, полученными в аттестованном программном комплексе «МАВР-5.1».

Расчеты выполняются на основе [3] и других нормативных документов с учетом: НДС при термосиловых нагрузках проектных режимов эксплуатации; возможности зарождения и докритического роста трещин в зоне перфорации при накоплении повреждений; статистического разброса механических и прочностных свойств материала, характеристик дефектности материала, параметров водно-химического режима; вероятностного характера чувствительности и достоверности системы неразрушающего контроля дефектов.

Актуальность работы связана с необходимостью расчётного обоснования рисков при различных моделях разрушения, а также с разработкой более точных расчётных методик в соответствии с актуальной нормативной базой.

Научная новизна заключается в разработке методики оценки надежности энергетического оборудования с учетом различных моделей зарождения и развития трещины.

Литература

1. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 2006.
2. **Черепанов Г.П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
3. **ГОСТ Р 59115.14-2021.** Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчёт на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора. М.: Российский институт стандартизации, 2021.

А.А.Калинина, студ.; рук. В.П.Радин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГО ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПАНЕЛИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Работа заключается в исследовании устойчивости плоской панели, находящейся в условиях воздействия сверхзвукового потока газа со скоростью U и сжимающего усилия N . Упругая панель удлинена в направлении, ортогональном потоку, и считается, что в ней реализуется состояние цилиндрического изгиба, а нормальный прогиб в пластине рассматривается как функция координаты x и времени. Края панели упруго закреплены от линейных перемещений с жесткостью c_1 , c_3 и угловых перемещений с жесткостью c_2 , c_4 .

Цель исследования — построение границ областей устойчивости на плоскости сжимающего усилия N и скорости потока U при варьировании жесткостей элементов закрепления панели по кромкам, а также оценка влияния внутреннего трения на границы флаттера.

Задачи исследования:

- исследование устойчивости плоской панели под воздействием сверхзвукового потока газа с применением динамического метода [1];
- определение возмущенного давления на панель [2];
- исследование зависимости характеристических показателей от параметров нагрузки с применением критерия Рауса-Гурвица;
- получение решения уравнения возмущенного движения в виде разложения по формам собственных колебаний [3];
- построение графиков исследуемых зависимостей в программе MATLAB.

Актуальность работы заключается в востребованности полученных результатов для проектирования элементов аэродинамических конструкций, находящихся в сверхзвуковом потоке газа.

Новизна научного исследования заключается в комплексном анализе устойчивости упруго закреплённой панели в сверхзвуковом потоке с одновременным учётом сжимающего усилия, варьируемой жёсткости крепления кромок и влияния внутреннего трения, что позволяет выявить дестабилизирующий эффект малого демпфирования на границу флаттера.

Литература

1. **Болотин В.В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. — М.: Физматгиз, 1961.
2. **Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н.** Аэроупругость конструкций. М.: Наука, 2000.
3. **Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П., Щугорев А.В.** Решение неконсервативных задач теории устойчивости. М.: Физматлит, 2017.

Л.Н. Васюнькина, студ.;
рук. Е.В. Позняк, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС УНИКАЛЬНОЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПЕШЕХОДНОГО МОСТА

Цель исследования — разработка расчётной модели и проведение прочностного и динамического анализа конструкции однопролетного пешеходного моста.

Задача исследования:

- выбор конструкции пешеходного моста с оригинальным современным дизайном, исходя из общемировых трендов в проектировании подобных конструкций; анализ типичных воздействий и рисков [1, 2];
- определение исходных данных для моделирования (геометрические размеры, сечения, материалы, нагрузки в соответствии с [3]) и разработка конечно-элементной расчётной модели в программном комплексе СТАРКОН [4];
- нормативный расчёт конструкции в ПК СТАРКОН в соответствии с [3];
- определение собственного спектра колебаний и проверка возможности резонанса от согласованных действий пешеходов.

Актуальность настоящей работы определяется сложившейся тенденцией к проектированию оригинальных нестандартных и уникальных конструкций пешеходных мостов, при этом существует риск возникновения резонансных эффектов от согласованных действий пешеходов (раскачивание, ходьба в шаг).

Новизна научного исследования заключается в дополнении нормативного расчёта на статические нагрузки от пешеходов динамическим анализом на согласованные действия людей, которые могут привести к резонансным эффектам.

Исследование проведено с использованием программного комплекса ПК СТАРКОН для моделирования и прочностного анализа конструкций.

Литература

1. He L., Castoro C., Aloisio A. and other. Investigation of a butterfly-arch stress-ribbon pedestrian bridge under ambient excitation: dynamic identification, FE modelling and parametric optimization// Procedia Structural Integrity 44, 2023.
2. Bergenudd J., Battini J.-M., Crocetti R. Dynamic analysis of a pedestrian timber bridge considering the connections and pile foundations// Structures 74, 2025.
3. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы.
4. Программный комплекс для расчёта строительных конструкций на прочность, устойчивость и колебания STARK ES 2025. Руководство пользователя. Москва, ООО «Еврософт», 2025.

М.А. Жданов, студент; рук. А.А. Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРУГЛОЙ ГОФРИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ КАК КОНСТРУКТИВНО ОРТОТРОПНОЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гофрированные пластины широко используются в разных отраслях промышленности: в машиностроении, строительстве и т.д., вопрос исследования возможности их потери устойчивости является актуальным.

В данной работе рассматриваются жёстко закреплённые по внешнему контуру гофрированные пластины синусоидального профиля с окружной гофрировкой, нагруженные равномерным нормальным давлением. Диаметр проекции пластины на горизонтальную плоскость 1000 мм, толщина 5 мм. При проведении исследований варьировались глубина гофрировки, которая задавалась равной следующим значениям: [100; 66.7; 33.3; 5; 1; 0] мм, а также число полуволн синусоиды, равное значениям из ряда: [1; 3; 5; 7; 31]. В качестве материала пластины принята сталь Ст3. В работе были рассмотрены гофрированные пластины только с целым количеством волн, т.к. паттерны поведения для целых и нецелых количеств волн отличаются [1].

Исследована возможность потери устойчивости гофрированных пластин до возникновения в них пластических деформаций.

Новизна работы состоит в адаптации методики, приведённой в [2] для статических расчётов гофрированных пластин, рассматриваемых как конструктивно ортотропных, с целью анализа таких систем на устойчивость.

Погрешность определения напряжений в задачах изгиба гофрированных пластин с использованием вышеуказанного подхода составляет около 10%. В работе обсуждаются причины отличий в результатах и даются предложения по совершенствованию методики.

Практическое использование применяемого авторами подхода к расчёту на устойчивость гофрированных пластин как конструктивно ортотропных, может позволить сократить время, необходимое для получения инженерных оценок величин критических нагрузок.

Литература

1. **Феодосьев В.И.** О больших прогибах и устойчивости круглой мембраны с мелкой гофрировкой. Москва, 1945.
2. **Zheng Ye.** Berdichevsky V.L., Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51. pp. 2073–2083.

В.С. Ткаченко, студ.; рук. Е.В. Позняк, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ С ГИСТЕРЕЗИСОМ ПО МОДЕЛИ БУКА-ВЕНА

Цель исследования — разработка программы для численного моделирования нелинейных динамических систем с гистерезисом на основе модели Бука-Вена.

Задачи исследования:

1. Привести полное математическое описание модели Бука-Вена [1, 2] сформулировать и решить задачу о движении системы с одной степенью свободы с гистерезисом по модели Бука-Вена при заданном кинематическом воздействии, разработать алгоритм и получить решение поставленной задачи в Python.
2. Выполнить анализ полученного решения в зависимости от параметров модели Бука-Вена.
3. Разработать алгоритм и объектно-ориентированный программный код на C# для решения поставленной задачи.
4. Провести сравнительный анализ результатов.

Актуальность исследования состоит в необходимости изучения и моделирования нелинейных динамических систем с гистерезисным поведением. Подобные системы находят широкое применение в современной инженерии — от различного рода демпферов [2], и амортизаторов [1] до разнообразных объектов в машиностроении и строительстве [3].

Новизна проведённого исследования состоит в разработке алгоритма и оригинального программного модуля для численного моделирования динамических систем с гистерезисом на основе модели Бука-Вена. Модуль имеет ООП-структуру с классами модели, решателя, постпроцессора и включает интерфейс ввода данных, справочник и руководство пользователя.

Литература

1. Данилин А.Н., Кузнецова Е.Л., Курдумов Н.Н., Рабинский Л.Н., Тарасов С.С. Модифицированная модель Бука-Вена для описания гистерезиса нестационарных процессов // Вестник ПНИПУ. Механика, 2016, № 4, с. 187–199.
2. Bouc, R. (1967). “Forced vibration of mechanical systems with hysteresis”. Proceedings of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillation. Prague, Czechoslovakia. p. 315.
3. Xudong Zhu, Xilin Lu. Parametric Identification of Bouc-Wen Model and Its Application in Mild Steel Damper Modeling // Procedia Engineering 14 (2011) 318–324.
4. P.T. Brewick, R. Farzad. Hierarchical Bayesian calibration of Bouc–Wen hysteretic models with applications to seismic isolators // Mechanical Systems and Signal Processing 237 (2025).

Д. Лоренсана Котилья, студ.;
рук. П.Ю. Петров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Эксплуатация энергетического оборудования сопряжена с износом критически важных деталей, таких как валы питательных насосов на тепловых электростанциях. Ручная дуговая сварка, традиционно применяемая на Кубе для восстановления изношенных посадочных мест таких валов, существенно зависит от квалификации сварщика и не обеспечивает стабильное качество наплавляемых поверхностей.

В качестве объекта исследования рассматривалась технология высокоскоростного газопламенного напыления (*High Velocity Oxygen Fuel*, HVOF) износостойкого покрытия порошков Cr_3C_2 (75%) и NiCr (25%) на валы насосов из стали AISI 420. Эксперименты планировались и осуществлялись с учётом опыта специалистов АО «Плакарт» по нанесению износостойких покрытий на изделия различного назначения [1]. В эксперименте менялись: расход керосина — 21...23 л/мин, расход кислорода — 750...850 л/мин и количество проходов — 32...48. Было изготовлено 4 образца с различным сочетанием этих параметров. Остальные параметры напыления оставались неизменными при изготовлении всех образцов.

У изготовленных образцов разная толщина покрытия: у первого — 411,87 мкм, второго — 320,78 мкм; третьего — 337,47 мкм и четвёртого — 328,21 мкм. У образца 2 наименьшая средняя толщина слоя одного прохода (6,68 мкм), но при его изготовлении заданы наибольшие значения расхода керосина и кислорода. Следовательно, при таком напылении формируется более плотный слой. Эту гипотезу подтверждают результаты определения средних значений микротвёрдости нанесённых слоёв на образцы-свидетели. Оптимальным режимом напыления является режим с наибольшими значениями расхода керосина (23 л/мин) и кислорода (850 л/мин), при которых обеспечивается высокая адгезионная прочность и наибольшее среднее значение микротвёрдости (1177 HV).

Дальнейшие исследования будут проводится на образцах, изготовленных из стали AISI 420 с диаметром посадочных мест вала питательного насоса.

Литература

1. Пичев, В.С. Опыт и перспективы применения газотермических покрытий АО «Плакарт» для деталей стационарных газотурбинных установок / Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию юбилею института Энергомашиностроения и механики. Сборник материалов и докладов конференции, 2024, с. 238–240. — eLIBRARY ID: 68081824

Э.И. Манчев, асп.; рук. А.И. Куменко, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗНОСА И ДЕФЕКТОВ СБОРКИ В РОТОРАХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

В процессе эксплуатации многоступенчатых центробежных насосов происходит износ щелевых уплотнений из-за: наличия твердых частиц в перекачиваемой среде, дефектов сборки, повлекших за собой трение, из-за кавитации. Основной задачей является вычисление критических частот роторно-подшипниковой системы с учетом вышеуказанных факторов. С помощью классических формул, набора экспериментальных данных и современных численных методов вычисляются динамические характеристики уплотнений, подшипников и строится диаграмма Кэмпбелла, которая будет меняться и давать качественное представление о поведении системы при определенном дефекте.

Расчетно-экспериментальный метод предполагает поэтапное решение трех задач: гидравлики, гидродинамики и роторной динамики. Задача гидравлики сводится к расчету перепадов давления и расходов в сечениях всего гидравлического тракта. Наличие экспериментальных данных позволяет корректировать принятые расчетные модели набором поправочных коэффициентов, оценивающих погрешность между классическими формулами [1], численными методами и действительными значениями. Уточненные значения перепадов и расходов используются в задаче гидродинамики — в решении модифицированного уравнения Рейнольдса для турбулентного потока [2] и в вычислении динамических характеристик щелевых уплотнений. Для опорных подшипников решается осредненное уравнение Рейнольдса на поверхностной КЭ-сетке [3]. Последней задачей является моделирование роторно-подшипниковой системы, например, с помощью 3D-модели в программной среде Ansys.

Результаты позволяют оценить степень износа уплотнений по критической частоте. Например, двойной износ снижает критические частоты более чем в два раза и сразу проявляется на испытательном стенде повышенными вибрациями.

Литература

1. **Михайлов К.А., Малюшенко В.В.**, Конструкция и расчет центробежных насосов высокого давления. — М.: Машиностроение. — 1971, 304 с.
2. **Chen W.J., Gunter E.J.** Dynamics of rotor-bearing systems // Victoria, Canada: Trafford Publishing. — 2010.
3. **Someya T.** et al. Journal-bearing databook. — Springer Science & Business Media, 2013.

К.Р. Катышев, студ.;
рук. В.К. Драгунов, д.т.н., проф. («НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КПД ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА НАКЛОНА МИШЕНИ, ТОКА ФОКУСИРОВКИ И ЧАСТОТЫ РАЗВЕРТКИ

Фундаментальной задачей материаловедения является управляемое изменение структуры, фазового состава, свойств материалов для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделий. Одним из вариантов решения указанной задачи является изменение поверхностных слоев, отличающихся свойствами и характеристиками от основного металла. Заданные конструкторской документацией требования к особым свойствам поверхности деталей специального назначения обычно формируются посредством локальной поверхностной обработки, в том числе концентрированными источниками энергии. При этом локальность термической обработки обеспечивает сохранность формы изделия. Особое место в обработке поверхности изделий машиностроения занимают электронно-лучевые технологии. Безынерционность управления потоком ускоренных заряженных частиц позволяет получать сложную траекторию движения и переменную интенсивность (в том числе импульсную) воздействия электронного потока на поверхности обрабатываемых изделий. Вместе с тем, требования уменьшения объёма и веса конструкции приводят к конструированию деталей достаточно сложной конфигурации. Из-за наличия поверхностей в таких деталях, имеющих сложную геометрию, применение таких технологий несколько усложняется и сдерживается.

Главная задача исследования заключалась в получении зависимостей угла наклона мишени, тока фокусировки и частоты развертки на эффективность электронно-лучевой обработки. В качестве объекта исследования использовались металлические материалы при их электронно-лучевой обработке с различными углами встречи электронного потока.

В рамках представленной работы исследовали эффективный коэффициент полезного действия (КПД) в зависимости от угла наклона мишени, тока фокусировки и частоты развертки. Как показали результаты экспериментов и последующая статистика, эффективный КПД для разных токов фокусировки и частоты развертки можно считать постоянным. В зависимости эффективного КПД от угла наклона наблюдается обратная зависимость.

С.В. Попиль, асп.; рук. А.А. Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УТОНЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Научное сообщество непрерывно работает над совершенствованием нормативных документов и методик, направленных на оценку технического состояния участков трубопроводов с утонениями и дефектами [1]. Обеспечение надежности и безопасности этих систем, играющих одну из ключевых ролей в работе энергообъектов, остается важнейшей научно-технической задачей. Несмотря на то, что инвестиционные затраты на этапе строительства и монтажа трубопроводной сети для энергетических объектов относительно невелики и составляют около 10% от общей стоимости проекта, потенциальные риски выхода из строя труб чреваты серьезными последствиями — от снижения производительности до полных остановов и человеческих жертв. Для схематизации утонений широко применяются модели идеализированной формы, такие как сферические или эллипсоидальные. Средства измерения неразрушающего контроля уже сейчас дают возможность составлять достаточно подробную форму утоненных мест, позволяя более детально описать текущее напряженно-деформированное состояние [2].

Автором была создана программа автоматической генерации параметрической твердотельной модели трубопровода с локальным утонением. Производится генерация сфер-инструментов, вычитающих объем из цилиндра, не выходящих за пределы зоны, установленной начальными параметрами.

Научная новизна работы состоит в детальном моделировании геометрии утонения, и исследования влияния формы поверхности на особенности напряженно-деформированного состояния. Произведено сопоставление полученных результатов с результатами при использовании идеализированных форм утонений металла.

Литература

1. **Haile Woldeesellasse, Solomon Tesfamariam.** Risk analysis of onshore oil and gas pipelines: Literature review and bibliometric analysis. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience* 2 (2023).
2. **Taha Sheikh, Santhakumar Sampath, Bishakh Bhattacharya.** Bimorph sensor based in-line inspection method for corrosion defect detection in natural gas pipelines. *Sensors and Actuators: A. Physical* 347 (2022).

А.Ю. Чухлебова, студ.; рук. А.А. Шипков, доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РОСТ ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА В КРУГОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ТРУБОПРОВОДА ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Цель исследования — оценка надежности и долговечности узла трубопроводной системы энергоблока АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР с учетом развития трещиноподобного дефекта в круговом сварном соединении на основе вычислительного моделирования в диапазоне эксплуатационных нагрузок, учитывающих переход энергоблоков на повышенную мощность.

Задачи исследования:

- построение математической модели трубопровода, включая сварное соединение с дефектом;
- проведение расчета роста дефекта аналитически и в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов (МКЭ) в варьируемом диапазоне параметров эксплуатации;
- анализ полученных результатов с использованием нормативных документов [1, 2] и сопоставление результатов по МКЭ и при полуэмпирическом расчете на основе подходов механики разрушения;
- оценка возможностей совершенствования нормативной документации и прикладных методов анализа.

Актуальность работы определяется необходимостью исследования влияния роста дефекта в трубопроводах АЭС на безопасность и надежность конструкции с учетом старения действующих энергоблоков и изменения параметров рабочих сред при переходе на повышенную мощность.

Результаты исследования являются новыми, с учетом комплексного учета параметров эксплуатации трубопроводов и свойств материала и сопоставления методов анализа, использующих полуаналитические подходы в сравнении с современными программными инструментами, и могут быть использованы для оценки остаточного ресурса и повышения ресурса элементов трубопроводов блоков АЭС.

Литература

1. **ГОСТ 59115.14–2021.** Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора. М.: Стандартинформ, 2021.
2. **ГОСТ 58328–2028.** Трубопроводы атомных станций. М.: Стандартинформ, 2018.

И.А. Подобедов, студ.; рук. А.А. Шипков, доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В настоящее время атомные электростанции (АЭС) являются одним из основных способов генерации электроэнергии, что заставляет более подробно исследовать особенности, связанные с их проектированием и эксплуатацией. В частности, при расчете на сейсмостойкость элементов трубопроводов АЭС актуальна проблема учета влияния дефектов на изменение прочностных характеристик.

Для расчета на прочность и сейсмостойкость элементов АЭС широко используются специализированные программные комплексы (ПК), применяются требования нормативных документов (НД) и рекомендательные подходы, описанные в профильной литературе. Так, в [1] содержатся требования, предъявляемые к расчету элементов трубопровода на сейсмостойкость. Наряду с вышеупомянутым СНиП, выступают [2], в которых указаны расчетные коэффициенты для нагрузок при разных видах нагружения отдельных элементов конструкции. Однако подробного описания нахождения этих коэффициентов в данной документации не приводится, что и послужило предпосылкой проведения исследования того, как и насколько определенные дефекты могут повлиять на сейсмостойкость. Также в данной работе было рассмотрено влияние сейсмических нагрузок на развитие эксплуатационных дефектов в элементах трубопроводов.

В данной работе учет влияния дефектов трубопровода на его сейсмостойкость был рассмотрен с помощью ANSYS, STADT и ряда других программных комплексов. В качестве дефектов в данной работе были рассмотрены трещины, появляющиеся из-за действия вибрационных нагрузок, и утонения металла элементов трубопровода, возникающие в ходе длительной эксплуатации. Результаты, полученные в работе, могут быть полезны при решении задач, связанных с проектированием трубопроводных систем АЭС, а также при оценке сейсмостойкости элементов этих систем под влиянием эксплуатационных дефектов.

Литература

1. **СНиП II-7-81***. Строительство в сейсмических районах. — М.: ФГУП ЦПП, 2007.
2. **НП-031-01**. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — Госатомнадзор России, 2002.

Д.В. Югай, студ.; рук. А.Ю. Марченков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТВЁРДОСТИ И ПРОЧНОСТИ В АНИЗОТРОПНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

При проектировании изделий и конструкций выбор материала осуществляется на основе значений его механических характеристик, которые, в свою очередь, получают по результатам механических испытаний. Кратковременные характеристики прочности и пластичности обычно определяют испытанием на растяжение, которое позволяет получить информацию о свойствах материала на стадиях упругой, упругопластической деформаций и разрушения. Однако испытание на растяжение является дорогостоящим и трудоемким, поэтому в качестве его альтернативы используют безобразцовый метод контроля, основанный на инденторных испытаниях, при которых измеряют характеристики твердости и пересчитывают их на показатели прочности [1]. Для изотропных материалов взаимосвязи между характеристиками прочности и твердости известны. В то же время для анизотропных тел такие взаимосвязи не выполняются — для них по результатам индентирования восстановить диаграмму растяжения невозможно.

В данной работе производится поиск взаимосвязи характеристик твердости и прочности для анизотропного материала при различных видах механических испытаний. В качестве объекта исследования выбраны наплавленные изделия из титанового сплава ПТ-3В, из которых были вырезаны образцы в трех различных направлениях относительно направления наплавки. Экспериментальная часть включает проведение механических испытаний образцов при разных видах нагружения, в ходе которых сопоставлялись получаемые значения прочности с показателями твердости.

Личный вклад автора работы заключается в проведении исследований, обработке экспериментальных данных и анализе полученных результатов.

Перспективой данной работы является выявление устойчивых взаимосвязей характеристик твердости с характеристиками прочности с целью возможности получения быстрого и недорогого их определения для анизотропных материалов, полученных с использованием аддитивных технологий. Результаты работы можно использовать при совершенствовании методик безобразцового контроля анизотропных тел.

Литература

1. **Матюнин В.М. и др.** Механические и технологические испытания конструкционных материалов: учебное пособие для вузов. М.: МЭИ, 2018.

*И.В. Рыкунов, студ.; А.А. Девятьяров, студ.;
рук. В.Ю. Попов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В CAE FIDESYS

Подготовка расчетных моделей сложных инженерных конструкций на основе CAD-моделей, содержащих сотни различных крепежных элементов (болтов, гаек, шайб и т.д.), является крайне трудоемкой задачей. Существующие инструменты автоматизации в CAE-системах хоть и позволяют упростить подготовку, не способны обеспечить требуемый уровень автоматизации из-за необходимости прямого визуального анализа конструктивных элементов в процессе подготовки.

Целью работы является разработка и внедрение инструмента автоматизации на основе искусственного интеллекта для автоматического распознавания и классификации крепежных элементов с целью значительного ускорения процесса подготовки расчетных моделей в программном комплексе CAE Fidesys.

Были исследованы и протестированы три основных группы методов классификации 3D-объектов: проекционные методы (Multi-View — использование проекции 3D-моделей и сверточных нейронных сетей — ResNet, EfficientNet), воксельные методы (Voxel-Based — воксельные сетки и использование 3D-CNN — VoxNet, ResNet 3D), методы на основе облаков точек (Point Cloud — прямая работа с данными STL-моделей с помощью архитектуры PointNet++).

На основе синтетических данных (более 70 тыс. моделей, сгенерированных по стандартам ГОСТ), моделях из открытых источников и реальных инженерных моделях был проведен сравнительный анализ точности и производительности каждого подхода. Наилучшую точность для 7 классов крепежных деталей (болт, гайка, винт, шайба, шуруп, шпилька, другое) показал подход на основе облаков точек и архитектура PointNet++ [1] — порядка 80% в исходном варианте и 90% после доработки архитектуры, выполненной авторами работы.

После тестирования разработанный инструмент был внедрен в CAE Fidesys как модуль с использованием Python API препроцессора.

Литература

1. Qi CR, Yi L, Su H, Guibas LJ. PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space // Advances in neural information processing systems. 2017, 30.

А.А. Девятьяров, И.В. Рыкунов, студ.;
рук. В.Ю. Попов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И ПОЛНОТЕЛЫХ ШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Оценка усталостной долговечности является критически важной задачей при проектировании шин. Традиционные подходы, основанные на физическом моделировании и натурных испытаниях, требуют значительных временных и финансовых затрат, что создает потребность в разработке точных и быстрых прогностических моделей, позволяющих упростить процесс разработки новых конструкций шин.

Целью работы является разработка методики оценки параметров и свойств конструкции шины, а также предсказания числа циклов нагружения до разрушения для пневматических и массивных шин на основе методов машинного обучения, позволяющей сократить время разработки.

Предложенный подход требует решения набора сравнительно простых задач с произвольными параметрами и свойствами модели для оценки их влияния на усталостную долговечность, на основе которых обучается нейронная сеть, позволяющая в дальнейшем быстро прогнозировать долговечность произвольной конструкции шин. В качестве признаков рассматривались геометрические параметры, а также свойства материала.

В качестве основного метода машинного обучения был выбран градиентный бустинг (CatBoost/XGBoost/LightGBM) [1] ввиду его высокой эффективности при работе с табличными данными, нелинейными зависимостями и способности учитывать сложные взаимодействия признаков.

Для оценки прогностического качества моделей использовалась кросс-валидация и тестовые выборки. Критериями выступили Mean Absolute Percentage Error (MAPE) и коэффициент детерминации (R^2), оценивающие точность предсказания числа циклов до разрушения.

Разработанные модели демонстрируют высокую скорость и точность прогнозирования с MAPE менее 5% на тестовой выборке в сравнении с прямым расчетом нелинейной механической задачи и позволяют более эффективно давать предварительные оценки на раннем этапе проектирования, по сравнению классическим подходом.

Литература

1. **O. Ammar, A. Al-Haija, Q. Aref, Abdullah, A. Taleb, Anas.** Comparative Study of CatBoost, XGBoost, and LightGBM for Enhanced URL Phishing Detection: A Performance Assessment. // Jour. of Intern. Serv. and Inform. Sec. 2023, 13, 1–11.

*М.П. Петрова, асп. (НИУ «МЭИ»),
Э.М. Махсудян, студ. (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
рук. А.Е. Смирнов, к.т.н., доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
рук. А.Ю. Марченков, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПИРОЛИТИЧЕСКИХ КАРБИДОХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЯХ

В настоящее время широко применяются пиролитические карбидохромовые покрытия (ПКХП) на основе бис-ареновых соединений хрома (общей формулы Ar_2Cr). Технология получения таких покрытий — пиролитическое хромирование, осуществляемое путём термического разложения металлоорганической жидкости при температуре 500°C в вакуумном реакторе, в результате чего карбидохромовое покрытие осаждается на поверхность детали, а паровая и газовая фазы удаляются из камеры установки [1]. ПКХП обладают высокой твердостью, механической прочностью, трещино- и износоустойчивостью. Детали, на которые наносятся данные покрытия, должны подвергаться упрочняющей термической обработке, т.к. недостаточно прочная подложка приведет к разрушению детали в условиях эксплуатации.

Цель исследования состоит в определении трещиностойкости ПКХП, нанесенных на стали Х12МФ, 95Х18, 8Х4В9Ф2-Ш после упрочняющей термической обработки. Исследовались образцы данных сталей двух групп: после предварительной (отжиг при 800°C) и окончательной (закалка при 1000°C и низкий отпуск при 200°C) термической обработки. С помощью металлографических исследований и кинетического индентирования оценивали влияние термической обработки на процессы разрушения покрытий при индентировании.

Личный вклад авторов заключается в подготовке образцов для исследований, проведении экспериментов и анализе результатов.

Новизна и практическая значимость исследования заключается в выявлении конкретных закономерностей изменения трещиностойкости ПКХП после термической обработки.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методики определения трещиностойкости хрупких материалов и покрытий методом инструментального индентирования» (договор № ПНИ-24/26-37) при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. Сомов О.В., Васин В.А., Ашмарин А.А. Исследование формирования карбидных фаз и трибологических свойств пиролитического карбидохромового покрытия на стали после отжига // Перспективные материалы. 2020. № 4. С. 79–88.

А.А. Панькина, асп.;
рук. А.Ю. Марченков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ: МИНИАТЮРНЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ БОЛЬШИХ ЗАДАЧ

Актуальность разработки методики определения характеристик ползучести на образцах малых размеров обусловлена необходимостью оперативного контроля конструкций, работающих в условиях высоких температур и длительных нагрузок, таких как корпуса реакторов АЭС. Традиционные испытания на растяжение требуют изготовления достаточно габаритных образцов и проведения длительного нагружения. Методы, основанные на сжатии миниатюрных образцов или вдавливания в них инденторов позволяют использовать материал, отобранный малоинвазивно, что делает их перспективным инструментом для оценки состояния металла и прогнозирования остаточного ресурса в ходе эксплуатации.

Ключевой проблемой таких методов являются искажения перемещений, вызванных температурными колебаниями при длительных испытаниях. В данной работе предложено и экспериментально апробировано техническое решение, которое заключается в применении методики, использующей анализ контактной динамической жесткости при нагружении образца индентором, не зависящей от паразитных тепловых дрейфов [1]. Контактная жесткость S связана с приведенным модулем упругости E_{eff} и геометрией контакта, а величина скорости ползучести при сжатии или вдавливании индентора $\dot{\epsilon}$ может быть определена по формуле:

$$S = 2\beta \sqrt{\frac{A}{\pi}} \cdot E_{eff} = \frac{\Delta F}{\Delta h}, \quad \dot{\epsilon} = \frac{\Delta S}{S},$$

где F — нагрузка, h — глубина индентирования, A — площадь контакта, β — коэффициент формы индентора (для плоского индентора равен 1).

Методика может быть применима и при испытании цилиндрических образцов малых размеров одноосным сжатием. Создание корреляционных зависимостей между данными, полученными на малых образцах при сложном напряженном состоянии, и классическими константами ползучести позволит перейти от планового обслуживания к стратегии управления по фактическому состоянию металла для критически важных объектов, повышая их безопасность и экономическую эффективность.

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10140, <https://rscf.ru/project/23-79-10140/>.

Литература

1. **Durst K., Maier V.** Dynamic nanoindentation testing for studying thermally activated processes from single to nanocrystalline metals // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2015. Vol. 19. No. 6. DOI: 10.1016/j.cossms.2015.02.001.

А.В. Дуб, студ.; рук. А.А. Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА УСТОЙЧИВОСТЬ И СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Оптимальный выбор параметров сетки конечных элементов имеет важное значение при расчете элементов строительных конструкций. Неправильно подобранные параметры могут привести к недооценке значений напряжений и деформаций, что в дальнейшем способно вызвать нарушение их проектной работоспособности.

В работе проведен анализ различных сеток конечных элементов (КЭ) и рассмотрено их влияние на результаты расчетов. Представлены методы и подходы к выбору КЭ модели, учитывая специфику и особенности конкретных задач:

1. Определение критической силы для шарнирно-опертой по двум противоположным сторонам пластины.
2. Определение собственных частот для шарнирно-опертой пластины.

В работе проведено сравнение влияния конкретных типов конечных элементов на результаты расчетов в программных комплексах (ПК) Ansys, CAE Fidesys, Stark ES, Зенит-95 и Логос. Рассмотрены пластины из конструкционной стали (коэффициент Пуассона 0,3) и материала со свойствами близкими к несжимаемому (коэффициент Пуассона 0,49). Проанализировано наличие тенденций к возникновению эффекта объемного запираания в использованных программных комплексах при моделировании объемными и оболочечными конечными элементами. Выполнена оценка сходимости результатов значений критической силы и низшей собственной частоты с ранее опубликованными данными [1, 2] и на последовательности вложенных сеток КЭ.

Предложены рекомендации по выбору конечно-элементной сетки и ее параметров для расчета прямоугольных пластин в различных ПК.

Полученные результаты могут быть применены при расчете строительных конструкций и использованы при оптимизации процесса КЭ моделирования, а также для повышения быстродействия и точности определения критических нагрузок и низших собственных частот колебаний в ПК, реализующих метод конечных элементов.

Литература

1. Болотин В.В., Вольмир А.С., Диминтберг М.Ф., Кильдибеков И.Г., Пановко Я.Г., Швейко Ю.Ю. Прочность. Устойчивость. Колебания. 1968.
2. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стрелы и пластин // Авиационные материалы и технологии. — 2016.

А.Ю. Балуцков, Х.Ю. Попандопуло, студ.;
рук. В.С. Модестов, к.т.н., доц.
(НОЦ «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной
энергетике» СПбПУ, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА МЕМБРАННОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Повышение ресурса — это одна из основных задач, стоящая при проектировании мембранного компрессора. Исходя из анализа развертывания функции качества (Quality Function Deployment Analysis) для всего изделия, основанного на работах последних лет, было выявлено, что динамика кривошипно-шатунного механизма (КШМ) напрямую влияет на выработку ресурса и риск преждевременного выхода из строя [1–3].

Для проведения модального анализа и определения собственных форм и частот, а также построения диаграммы Кэмпбелла для выявления резонансных режимов разработана компьютерная модель в программном комплексе MSC Adams с использованием программного инструмента пружинно-демпферной системы для моделирования воздействия на поршень мембраны и гидропривода.

Верификация производится на основании конечно-элементной модели, приведенной в работе [4], что позволяет определить собственные частоты системы для заданной конфигурации механизма с погрешностью результатов менее 8% при минимальном времени расчета.

Разработанный специализированный инструмент для интеграции в процесс проектирования позволяет быстро оценивать влияние масс-инерционных и упругих параметров КШМ на вибрационные характеристики, проверять конструкцию на отсутствие резонансов и производить анализ собственных частот при заданной резонансной частоте и принимать обоснованные решения по оптимизации конструкции.

Литература

1. **Giuffrida A., Colbertaldo P.** Overview of diaphragm compressors for hydrogen service: capacity, discharge pressure and operational challenges // *Journal of Energy Storage*. — 2025. — Т. 41. — С. 117286.
2. **Ren S.** Diagnosis method to identify diaphragm state of compressor and performance enhancement in hydrogen refueling applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2023. — Т. 49. — С. 1043–1055.
3. **Parida A., Muthukumar P., Dalal A.** A review on non-mechanical hydrogen compressors for hydrogen refuelling stations // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2025. — Т. 145. — С. 292–321.
4. **Yadav S., Wadkar S., Patil S.** Modal Analysis of Compressor Crankshaft // *International Journal of Scientific Research*. — 2013. — Т. 2. — С. 155–158.

Секция 54
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ
Robotic and mechatronic systems

Председатель секции:

д.т.н., профессор Меркурьев Игорь Владимирович

Секретарь секции: к.ф.-м.н., доцент Капустина Ольга Михайловна

А.Д. Ионина, студ.; рук. Г.Р. Сайпулаев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧЕТЫРЁХКОЛЁСНОГО РОБОТА С УПРУГОЙ ПОДВЕСКОЙ



Рис. 1. Пример робота с упругой подвеской шасси

На сегодняшний день в автомобильной отрасли происходит активное внедрение интеллектуальных систем управления движением, включая те, которые реализуют экстренное торможение в целях предотвращения аварий. Для построения таких систем управления возникает необходимость исследования и разработки вспомогательных методов предотвращения негативного влияния вибраций на устойчивость автомобиля [1, 2]. В работе [3] отмеча-

ется, что исследования динамики четырёхколёсных роботов с учётом упругости подвески и проскальзывания точек контакта колес является актуальной задачей для совершенствования систем экстренного торможения.

Целью работы является исследование динамики четырехколесного робота с учетом упруго-демпфирующих свойств подвески шасси при пространственном движении робота. В исследовании был проведён анализ динамики платформы с классическими колёсами (рис. 1). Для этого были построены уравнения динамики в форме уравнений Лагранжа второго рода. Конфигурация робота характеризуется 14-ю параметрами: координатами заданной точки платформы; углами ориентации платформы; углами вращения колес; смещениями геометрических центров колес относительно платформы, связанными с податливостью подвески. По результатам численного моделирования движения робота исследованы переходные процессы при наличии возмущений в начальных условиях.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка программного обеспечения и систем управления движением новых мобильных роботов, оснащенных сферическими колесами и омни-колесами» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Antonyan A.V., Anisimov V.R., Dvoeglazov E.A., Novogorodov D.A., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Ershov V.S., Furletov Y.M. Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode // World Electric Vehicle Journal. — 2024. — Vol. 15, No. 8. — P. 1–30.
2. Huang D., Zhang K., Sun J., Li W., Pei K. Braking Judder Test and Simulation Analysis of Commercial Vehicle // SAE Technical Paper. — 2024. — P. 1–15.
3. Korayem M.H., Dehkordi S.F., Aghajari M. Dynamic modeling of the extended mobile robot: Composed N parallel axles, suspension system, and wheels slippage // Scientia Iranica B. — 2023. — Vol. 30, No. 5 — P. 1595–1611.

*А.А. Демидов, А.Д. Ионина, студ.;
рук. Г.Р. Сайпулаев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИНАМИКИ И ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОМНИ-ПЛАТФОРМЫ, БАЛАНСИРУЮЩЕЙ НА СФЕРИЧЕСКОМ КОЛЕСЕ

В настоящее время актуальность мобильных роботов всенаправленного движения обусловлена возможностью их широкого применения при работе в условиях, требующих высокую маневренность транспортных средств. Одним из высокоманевренных роботов является Ballbot (шаробот) — мобильная платформа, балансирующая на сферическом колесе, и оснащенная колесами всенаправленного движения. В работе рассматривается конструкция шаробота, оснащенного тремя омни-колесами, симметрично расположенными на платформе. Компьютерная 3D модель робота представлена на рис. 1.

Целью работы является исследование динамики и построение закона управления движением шаробота. При построении модели динамики робота используется упрощенная модель омни-колес; проскальзывание точек контакта колес всенаправленного движения относительно сферического колеса отсутствует; движение сферического колеса по горизонтальной плоскости описывается моделью качения шара без верчения. В работе используется модель кинематики шаробота, описанная в статье [1], и предложен закон управления, обеспечивающий устойчивое движение робота по произвольной траектории с малыми углами крена и тангажа платформы.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка программного обеспечения и систем управления движением новых мобильных роботов, оснащенных сферическими колесами и омни-колесами» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.



Рис. 1. 3D модель шаробота

Литература

1. Saypulaev G.R., Saypulaev M.R., Demidov A.A., Sokiranskaya E.K., Semenyakina E.S., Lipatov A.A. Mathematical Modeling of the Spatial Kinematics of an Omni-platform Balancing on a Spherical Wheel // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — 2025 — P. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10971113

Г.Н. Калинин, студ.; рук. Г.Р. Сайпулаев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТАНОВКИ МЕКАНУМ-КОЛЕС НА МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ



Рис. 1. Пример мобильной платформы с механум-колесами

Мобильные роботы, способные осуществлять всенаправленное движение, широко применяются в различных областях человеческой деятельности. Примером таких роботов является управляемая платформа с четырьмя механум-колесами (рис. 1), рассматриваемая в настоящей работе.

Для построения законов управления движением робота необходимо разработать математические модели его кинематики и динамики [1]. Из-за

сложной конструкции механум-колёс при создании аппарата возникают различные погрешности, включая отклонения осей колёс от номинального положения. Несовершенства в установке механум-колес на платформу приводят к значительным ошибкам позиционирования робота [2]. Для учета погрешностей в законах управления необходимо проводить их идентификацию.

Поскольку прямое измерение несоосностей колёс физически затруднено, то их определение производится косвенно, путем идентификации из уравнений кинематики. Целью работы является построение указанной методики идентификации погрешностей.

Для решения поставленной задачи используется упрощенная математическая модель кинематики [2], учитывающая малость рассматриваемых погрешностей, и применяется метод наименьших квадратов. По результатам компьютерного моделирования на сгенерированном случайным образом наборе данных подтверждена пригодность разработанной методики.

Литература

1. **Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S.** An omni-wheel vehicle on a plane and a sphere // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. — 2011. — Vol. 7, No. 4. — P. 785–801. DOI: 10.20537/nd1104004
2. **Панкратьева Г.В., Мордин А.Е., Сайпулаев Г.Р.** Анализ точности позиционирования при конструкционных погрешностях в установке механум-колёс мобильной платформы // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2023. — Т. 23, № 4. — С. 356–364. DOI 10.23947/2687-1653-2023-23-4-356-364.

А.Е. Мордин, асп.; рук. И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Работа посвящена определению законов движения последовательного пятизвенного манипулятора, размещенного вблизи стационарной электронной пушки. При движении манипулятора точка падения электронного луча E (рис.1) должна проходить по криволинейной траектории на поверхности захваченной манипулятором детали — тела вращения. Принято, что электронная пушка размещена над рабочей зоной манипулятора так, что ось конуса электронного луча направлена вертикально вниз.

Кинематика манипулятора построена посредством матриц однородного преобразования с применением параметров Денавита-Хартенберга. Моделирование тела вращения и траектории на его поверхности (рис. 2) выполнено в цилиндрической системе координат, причем оси вращения тела и выходного звена манипулятора совпадают.

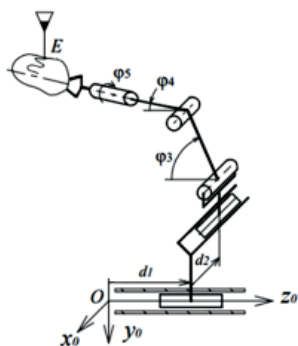


Рис. 1. Модель манипулятора

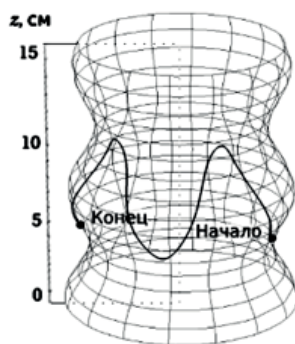


Рис. 2. Модель детали и траектории на его поверхности

При определении законов движения принято, что манипулятор в каждый момент времени обеспечивает строго вертикальное расположение нормали к поверхности удерживаемого тела в проходимой в данный момент точке тела. При этом нормаль и ось конуса электронного луча коллинеарны, как в общем случае сваривания плоских деталей [1].

В результате моделирования получены кинематические законы движения манипулятора, позволяющие запланировать прохождение точкой падения лазерного луча E установленной траектории на поверхности тела.

Литература

1. Назаренко О.К., Истомин Е.И., Локшин В.Е. Электронно-лучевая сварка. М.: Машиностроение, 1966.

*А.В. Солдатов, студ.;
рук. Б.И. Адамов, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КОМПЛЕКСНАЯ РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РОБОТА ДЛЯ ВАЛКИ ДЕРЕВЬЕВ: ОТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДО ПРОТОТИПА

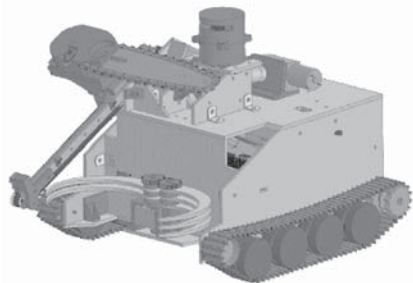


Рис. 1. 3D-модель робота

В настоящее время проблема лесных пожаров не перестаёт быть актуальной. Использование роботизированных систем для тушения пожаров и решения вспомогательных задач позволяет обезопасить человека и повысить эффективность.

Целью настоящей работы является создание прототипа гусеничного робота (рис. 1), предназначенного для валки деревьев, предотвращающей распространение лесного пожара. В работе рассматривается проектирование основных

узлов, подбор моторов и анализ динамики управления движением.

В ходе выполнения данной работы был разработан и собран прототип валочного робота. Для выбора необходимых моделей двигателей проведены нагрузочные расчёты моторов на основе статического анализа [1–3]. Также было проведено исследование динамической модели робота и алгоритмов управления движением с помощью обратной связи по координатам робота (x , y — координаты центра корпуса в горизонтальной плоскости движения, ψ — угол поворота корпуса относительно вертикальной оси), вычисляемым в абсолютной системе координат.

Результат выполненной работы представлен в виде функционирующего прототипа робота. Данный прототип позволит проводить исследования движения платформы с гусеничным шасси, а также реализовать управление при помощи машинного зрения.

Литература

1. **Казаченко Г.В., Кислов Н.В.** Статический и тяговый расчет горной гусеничной машины: учебное пособие по дисциплине «Машины и комплексы открытых горных работ» и «Горные машины» / Г.В. Казаченко, Н.В. Кислов. — Мн.: БНТУ, 2005. — 55 с.
2. **Бирман А.Р., Локштанов Б.М., Орлов В.В., Гусева Т.А., Иванов В.А.** Описание процесса пиления цепными пилами и расчет затрачиваемой энергии // Журнал Системы Методы Технологии. — 2023. № 2(58).
3. **Варганов В.О., Аввакумов М.В., Колычев М.В., Гребенникова В.М., Романов В.А.** ПЕРЕДАЧА ВИНТ-ГАЙКА: учебное пособие. — СПб., 2015. — 57 с.

К.С. Глушков, студ.;
рук. И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОПОРЕ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения производительности труда и безопасности выполнения технологических работ с использованием робототехнических систем. Известны разработки четырех- и шестиступенчатых шагающих роботов, способных перемещаться по пересеченной местности и по вертикальным опорам. Например, биомиметический робот RiSE компании Boston Dynamics (США) использует конечности с микрозацепами и хвост, обеспечивающие перемещение по стенам и деревьям [1].

В данной работе поставлена задача разработки робота с двумя конечностями, реализующими вертикальное перемещение по опоре с круговым или квадратным поперечным сечением.

Робот состоит из корпуса и двух управляемых конечностей, поочередно охватывающих вертикальную опору и фиксирующих положение одной опорной конечности за счет контактного трения. С помощью общих теорем динамики составлена математическая модель робота и проведено исследование кинематических и динамических характеристик его движения. Рассмотрены процессы управляемого переноса веса робота на опорную конечность.

С использованием программного комплекса SolidWorks была построена 3D-модель робота, включая детализацию компонентов для 3D печати и сборки прототипа робота. Для прототипа разработана электрическая, измерительная и управляющая схема робота. Создано и прошло отладку программное обеспечение для управляющей движением робота микроконтроллерной платы Arduino Uno. Спроектирован и собран первый прототип робота, способный охватить вертикальную трубу и перемещаться по ней на заданную высоту.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа робототехнического комплекса с нежесткими конструкционными элементами для обследования труднодоступных высотных осветительных и электросетевых мачт» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. **G.C. Haynes et al.** Rapid pole climbing with a quadrupedal robot // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009, pp. 2767–2772, doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152830

Д.Р. Зубрильчев, асп.;
рук. Б.И. Адамов, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ДОСТИЖИМОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Современные промышленные манипуляторы критически зависят от точности управления инструментом. Наличие кинематических ограничений приводит к недостижимости определённых положений рабочего органа. Эти ограничения затрудняют планирование движения и снижают надёжность автоматизированных операций. Поэтому важно построение рабочей области манипулятора, в том числе рабочей области конечного инструмента. Решение этой задачи позволит разработать более эффективные алгоритмы планирования и рекомендации по конфигурации роботов.

В работе рассматривается класс манипуляционных роботов с пятью степенями свободы с вращательными шарнирами, три из которых имеют параллельные оси, например: Yaskawa MOTOMAN MPK2F-5 и Yaskawa MOTOMAN MPK2F. Положение рабочего органа определяется шестью параметрами, в качестве которых могут быть приняты три координаты фиксированной точки E рабочего органа и три угла его поворота ψ , θ , γ , задающие ориентацию. При этом для решения обратной задачи кинематики в общем случае имеется шесть уравнений с пятью неизвестными. Тогда система уравнений, вообще говоря, несовместна.

Цель работы — представить в аналитической форме ограничения на углы ψ , θ , γ при различных фиксированных положениях точки E .

В рамках работы найдены в аналитическом виде решение прямой задачи кинематики и ограничения на углы ψ , θ , γ на примере конкретной конфигурации манипулятора.

Полученные результаты позволяют уточнить структуру рабочего пространства и использовать выявленные особенности при разработке алгоритмов планирования и выборе кинематических параметров робота.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа робототехнического комплекса с нежесткими конструкционными элементами для обследования труднодоступных высотных осветительных и электросетевых мачт» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Г.С. Дробчик, студ.; рук. О.М. Капустина, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

СИНГУЛЯРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ CORE SPACE STATION CABIN'S MANIPULATOR

Космические манипуляторы являются неотъемлемой частью космических станций. Манипуляторы выполняют жизненно важные задачи функционирования станций: перемещение грузов, помощь при стыковке и расстыковке, установка и ремонт оборудования, ассистирование во время выхода членов экипажа в открытый космос.

При проектировании и эксплуатации манипуляторов необходимо принимать во внимание их сингулярные конфигурации, попадая в которые механизмы теряют способность совершать некоторые движения.

В настоящей работе описано множество сингулярных конфигураций манипулятора Core Space Station Cabin's Manipulator (CSSCM) [1], работающего на китайской космической станции Chinese Space Station.

Кинематическая схема CSSCM рис.1 подобна схеме космического манипулятора Canadarm2 (SSRMS) [2], функционирующего на Международной космической станции. Оба аппарата являются кинематически избыточными семи-степенными механизмами, имеющими семь вращательных шарниров: по три в плече и запястье и один в локте. Манипуляторы отличаются линейными размерами.

В [3] представлены соотношения, описывающие множество сингулярных конфигураций манипуляторов, кинематически подобных SSRMS и CSSCM. Линейные параметры семи-степенных манипуляторов, рассмотренных в [3], произвольны. Такая форма представления соотношений сделала возможным их использование для нахождения сингулярных конфигураций CSSCM.



Рис. 1. CSSCM в космосе

Литература

1. **Daming Li, Rao Wei, Hu Chengwei, Wang Yaobing, Tang Zixin, Wang youyu** Overview of the Chinese Space Station Manipulator // Conference Paper // August 2015 // AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition. DOI: 10.2514/6.2015-4540.
2. **Canadarm2's Data Sheet** // Government of Canada: [site]. — URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/data-sheet.asp> (дата обращения: 05.12.2025). — Text: electronic.
3. **Nokleby SB.** Singularity analysis of the Canadarm2 // Mechanism and Machine Theory, vol. 42, no. 4, pp. 442–454, 2007.

В. Дони, В.В. Замашкин, асп.;
рук. О.В. Кубряк, д.б.н. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕНЗОРА ИНЕРЦИИ ЗВЕНЬЕВ В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК-ЭКЗОСКЕЛЕТ»

Корректное определение масс-инерционных характеристик звеньев является необходимым условием для построения адекватных уравнений движения, синтеза устойчивых и безопасных алгоритмов управления, а также оценки нагрузок, передаваемых на опорно-двигательный аппарат пользователя в системах типа «человек-экзоскелет», которые все шире применяются в реабилитационной и ассистивной робототехнике. Использование упрощенных моделей приводит к систематическим погрешностям в расчетах, что снижает биомеханическую совместимость.

Предложена методика расчета тензора инерции звеньев в составной системе «человек-экзоскелет», в которой анатомические сегменты пользователя и конструктивные элементы устройства рассматриваются как жестко связанные подсистемы.

Антропометрические параметры, такие как масса, координаты центра масс вдоль продольной оси и главные моменты инерции анатомических сегментов определяются по регрессионным зависимостям Зациорского-Селуянова [1] вида

$$p_{\text{сегм}} = B_0 + B_1 \cdot m_{\text{чел}} + B_2 \cdot h_{\text{чел}}$$

$p_{\text{сегм}}$ — требуемый антропометрический параметр, $m_{\text{чел}}$, $h_{\text{чел}}$ — масса и рост человека, B_0 , B_1 , B_2 — коэффициенты регрессии.

Для каждого конструктивного элемента звена формируется тензор инерции относительно собственного центра масс в системе координат, связанной со звеном. Затем тензор инерции переносится в центр масс составного звена с использованием обобщенной теоремы Гюйгенса-Штейнера.

Суммирование приведенных тензоров всех элементов формирует тензор инерции составного звена в его центре масс.

Применение предложенной методики повышает точность идентификации масс-инерционных характеристик сегментов руки человека, уменьшает расхождение между расчетной и фактической динамикой и способствует повышению биомеханической совместимости экзоскелетных систем, что критично для задач реабилитации и адаптивного управления.

Литература

1. Зациорский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н. Биомеханика двигательного аппарата человека. — М.: Физкультура и спорт, 1981. — 144 с.

А.С. Хохлов, студ.; рук. А.Б. Гавриленко (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЫНКА И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БПЛА

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся важнейшим компонентом современной цифровой агротехники. Их внедрение в аграрный сектор обусловлено необходимостью снижения затрат и повышения точности полевых операций [1].

В ходе проведённого исследования были проанализированы данные о патентной и научной активности (рис. 1) в области разработки БПЛА для сельского хозяйства за последние 15 лет. В качестве источников использованы массивы данных, проиндексированные в Rospatent.gov и Elibrary. Наблюдаемый рост публикаций свидетельствует о расширении области производства и сбыта БПЛА. На раннем этапе авторы публикаций делали акцент на базовые технические решения: силовые схемы, стабилизацию и навигацию. Позднее фокус их интересов сместился к системам обработки информации и взаимодействию с цифровыми платформами точного земледелия.

График на рис. 2 построен на основе проведённого исследования и анализа данных. Он демонстрирует рост производительности агродронов. Увеличение обрабатываемой площади за единицу времени отражает прогресс в конструкции, комплектующих и совершенствование алгоритмов полётных миссий. С течением времени отмечается значительный прирост показателей точности, автономности и грузоподъёмности.

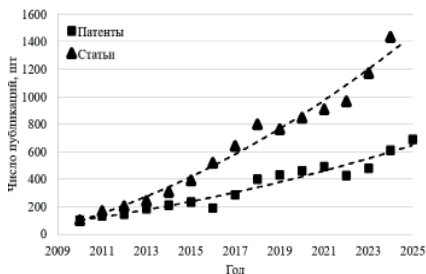


Рис. 1. Число патентов и научных статей, проиндексированных в Rospatent.gov и Elibrary, в год

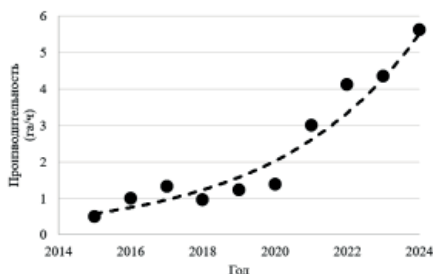


Рис. 2. Динамика роста производительности агродронов в обработке сельскохозяйственных культур (га/ч)

Таким образом, активно растёт научная и инженерная реализация, рыночная адаптация агродронов. Их применение способствует переходу к высокотехнологичному устойчивому сельскому хозяйству, повышает производительность, надёжность и управляемость агропроизводственных процессов.

Литература

1. Салаев Б.К. и др. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник аграрной науки Дона. 2022. № 4 (60). С. 29–44.

Э.М. Нессанс, Д.А. Шлемни, студенты;
рук. О.В. Кубряк, д.б.н. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ СУДНОМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА DDPG ДЛЯ СЛЕДОВАНИЯ ПО ТРАЕКТОРИИ

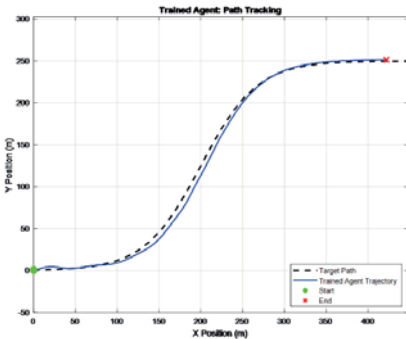


Рис. 1. Отслеживание траектории после обучения

Задача автономного управления судном приобрела особую актуальность в связи с развитием надводной робототехники. Решение этой задачи требует создания надёжных и адаптивных систем управления для выполнения длительных миссий без участия оператора. Например, для транспортировки грузов, мониторинга экосистем или аварийно-спасательных служб.

Для решения задачи следования по траектории выбрано обучение с подкреплением на основе алгоритма Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) [1], т.к. он хорошо подходит для задач

с непрерывным пространством действий. В отличие от классических методов управления, агенту (контроллер) заранее неизвестна модель динамической среды. В качестве объекта управления выбрана математическая модель грузового танкера KVLCC2 (длиной 7м, масштаб 1:45,7), описанная стандартной MMG-моделью [2].

Разработка агента включает создание как политики, так и алгоритма обучения. Разработана функция вознаграждения, учитывающая наблюдения от среды, поперечное отклонение (СТЕ), ошибку курса (НЕ) и плавность управления. Агент получает наблюдения от среды и отправляет сигнал угла перекладки руля. Скорость вращения винта постоянна, равна 12 об/с. Для моделирования среды и обучения агента использовалось программное обеспечение MATLAB/Simulink. Политика и функция ценности представлены нейронными сетями из двух полносвязных слоёв с 256 и 256 нейронами соответственно и функцией активации ReLU.

Полученный агент обеспечивает устойчивое следование по сигмоидальной траектории (рис. 1) длиной 450 м за время 180 с со средней ошибкой СТЕ < 7 м, НЕ < 20 градусов, средний угол перекладки руля +/- 10 градусов.

Литература

1. Lillicrap T.P. Continuous control with deep reinforcement learning // ArXiv:1509.02971, 2015.
2. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. J.: Mar. Sci. Technol., 2015.

С.С. Степанова, асп.; И.В. Меркурьев, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НОЖНИЧНОГО ПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА ПЛАТФОРМЫ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Платформы точного позиционирования широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как: строительство, машиностроение, медицина, электротехника и электроника, и другие [1]. Рассматриваемая платформа является универсальной для применения практически во всех упомянутых отраслях промышленности. Одним из функциональных узлов рассматриваемой платформы является ножничный подъемный механизм.

Рассматриваемый узел обладает центральной симметрией. При анализе механико-математической модели принимается, что деформация осуществляется в параллельных плоскостях, и ножничные механизмы жёстко соединены между собой. При расчете кинематической схемы [2] предполагается, что известна первичная погрешность позиционирования шарико-винтовой передачи. Полученные в результате расчета кинематической схемы показатели точности позиционирования позволяют проанализировать влияние упругих свойств системы. Показатели точности позиционирования дают возможность определить внутренние силовые факторы, необходимые для составления соотношения Максвелла-Мора [3]. Исследование динамической модели ножничного подъёмного механизма включает учёт диссипативных сил и вывод уравнения движения механизма.

Разработанная механико-математическая модель позволяет оценить влияние силовых и упругих факторов, а также влияние параметров механических передачи [4] на кинематику и динамику механизма.

Проведенный конечно-элементный анализ 3D-модели макета платформы точного позиционирования при помощи системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяет визуализировать физические параметры макета и оценить его поведение под нагрузками.

Литература

1. **Siciliano B., Khatib O.** Springer Handbook of Robotics. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
2. **Воробьев Е.И., Попов С.А., Шевелева Г.И.** Механика промышленных роботов: Учебное пособие для втузов: В 3 кн. Кн. 1: Кинематика и динамика. М.: Высш. Шк., 1988. — 304 с.
3. **Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П.** Сопротивление материалов. — М.: Высшая школа, 2008. — 560 с.
4. **Егоров О.Д.** Конструирование механизмов роботов. — М.: Абрис, 2012. — 444 с.

Направление XI

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Electrical power engineering

Руководитель направления:

Директор института

электроэнергетики НИУ «МЭИ»

к.т.н., доцент

Тульский Владимир Николаевич

Секция 55
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
Electric power engineering systems

Председатель секции: к.т.н., доцент Кузнецов Олег Николаевич

Секретарь секции: Анисимова Ирина Сергеевна

*И.А. Макова, студент, А.А. Курналеева, асп.;
рук. В.Н. Тульский (НИУ «МЭИ», Москва)*

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЁМА И МЕСТА УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Развитие энергосистемы России происходит каждый день: подключаются новые населенные пункты, строится множество промышленных комплексов, требующих большое количество электроэнергии. Данную электроэнергию необходимо доставлять до потребителей, причём её качество обязано быть на должном уровне. В узлах энергосистемы необходимо поддерживать баланс реактивной мощности, а для этого требуется найти оптимальное место установки компенсирующих устройств (КУ).

В рамках исследования ставится задача определения оптимального места установки и объёма мощности компенсации реактивной мощности в энергосистеме Липецкой области. Критериями для поиска оптимального решения служат снижение потерь активной мощности и повышение общественного благосостояния участников на рынке электрической энергии. Расчёт проведён в программной среде *RastrWin3*, и учитывает как технологические, так и рыночные факторы при выборе места установки КУ.

В соответствии с заданными критериями оптимизации был определен оптимальный узел для интеграции КУ в энергосистеме Липецкой области, проанализированы параметры установившегося режима на предмет их допустимости, а также рассчитаны узловые цены на электроэнергию. Результаты работы применимы для обоснования выбора места установки КУ с целью достижения наилучших характеристик с технической и экономической позиций работы энергосистемы.

Литература

1. **Идельчик В.И.** «Электрические системы и сети» // Оптимизация режимов электроэнергетических систем и электрических сетей. — 2-е изд., стереотипное, перепечатка с издания 1989 г. — М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2009.
2. **Ассоциация «НП Совет рынка».** Приложение 7. Регламент проведения конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед: <https://www.np-sr.ru/ru/regulation/joining/reglaments/1970>

С.Э. Израелян, студ.; рук. И.А. Платонова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Эоловая вибрация (далее — вибрация) представляет высокочастотные колебания проводов в виде стоячих волн, происходящие в вертикальной плоскости с частотой от 3 до 150 Гц и амплитудой, не превышающей диаметр провода. Вибрация возникает при скоростях ветра от 1 до 7 м/с [1]. Длительное воздействие вибрации может привести к усталостным изломам проволок и повреждению проводов воздушных линий (ВЛ).

В работе выполнено сравнительное исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) стандартных сталеалюминиевых и современных компактированных проводов на основе баланса мощностей, подводимой к проводу от ветрового потока и рассеиваемой проводом при вибрации [2]. Приведенные на рис. 1 результаты показывают, что при равенстве амплитуд частота колебаний компактированного провода АСку 240/32 на 31% выше, чем для провода АС 240/32. Таким образом, при выборе гасителей вибрации для защиты проводов нового поколения необходимо учитывать возможность возникновения колебаний в зоне более высоких частот.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны для специалистов в области проектирования и строительства ВЛ.

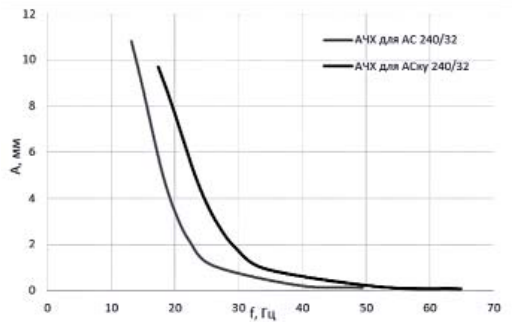


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики проводов АС 240/32 и АСку 240/32

Литература

1. Платонова И.А. Конструкции воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем: учеб. пособие / И.А. Платонова, Г.В. Шведов. — М.: Издательство МЭИ, 2024. — 108 с.
2. EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2006. — 609 с.

Ф.А. Чудин, студ.; рук. Р.В. Булатов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Одной из главных тенденций развития электроэнергетики на сегодняшний день является переход от централизованной модели генерации к децентрализованной, которая позволяет обеспечить надежное и эффективное электроснабжение удаленных потребителей [1].

Целью данной работы являлась оптимизация режима электрической сети с распределенной генерацией (РГ) по критерию минимума потерь активной мощности с применением генетического алгоритма.

Основными преимуществами генетических алгоритмов перед классическими являются: отсутствие необходимости знания градиента целевой функции, эффективная работа с большими многомерными пространствами, а также возможность взаимодействия как с непрерывными, так и с дискретными переменными.

В качестве объекта исследования была выбрана тестовая схема *IEEE-14* с двумя классами номинального напряжения 110–220 кВ, к нескольким узлам которой в ходе работы подключаются объекты РГ. Балансирующий узел в данной схеме является опорным по напряжению с возможностью неограниченной выдачи активной и реактивной мощности. В начале работы рассматривался исходный режим сети без установки объектов РГ, далее выполнялся поиск оптимальной по критерию минимума потерь в сети загрузки агрегатов РГ с учетом ограничений по выдаче активной и реактивной мощности агрегатов РГ, по допустимым границам напряжений узлов, а также по загрузке сетевых элементов. Моделирование сети выполнялось при помощи пакета *M*-файлов *Matpower* в программно-вычислительном комплексе *Matlab* [2].

После анализа результатов была определена наиболее рациональная загрузка подключаемых к сети агрегатов РГ, в результате оптимизации удалось достичь снижения потерь активной мощности на 34,8% относительно режима сети без установки объектов РГ. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и внедрении малой генерации и генерации на основе возобновляемых источников энергии.

Литература

1. А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов, Д. Холкин, К. Дацко. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М.: Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018. — с. 75.
2. R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-S'anchez. *Matpower User's Manual*. 2020.

*Д.С. Морозов, студент, А.А. Курналеева, асп.
рук. В.Н. Тульский (НИУ «МЭИ», Москва)*

РАЗРАБОТКА СУТОЧНОГО ГРАФИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ

Механизм управления спросом (УС) предоставляет потребителям электрической энергии возможность получать дополнительный доход за гарантированное снижение нагрузки в часы пикового спроса или высоких цен на оптовом рынке. Основной подход заключается в сравнении параметров режима при фактической нагрузке и при нагрузке в условиях срабатывания механизма УС [1].

Целью данной работы является формирование суточного графика электропотребления для потребителей Тамбовской области с использованием механизма УС, позволяющего повысить равномерность графика нагрузки энергосистемы, и обеспечить выполнение обязательств по снижению нагрузки при механизме УС (обычно 10:00–14:00 и/или 18:00–21:00) [2]. В рамках работы рассчитаны и проанализированы режимы, соответствующие исходному плановому потреблению электроэнергии по энергосистеме Тамбовской области и потреблению электроэнергии при срабатывании механизма УС.

Оценивая разницу между исходным графиком суточной нагрузки и графиком, сформированным с использованием механизма УС, можно сделать вывод об увеличении коэффициента равномерности. Более равномерный график нагрузки позволяет повысить коэффициент использования установленной мощности генерирующего и сетевого оборудования, а также не задействовать неэффективную генерацию для покрытия максимума нагрузки. Это приводит к снижению удельных затрат на производство и передачу электроэнергии, а следовательно, к снижению её себестоимости. Полученные результаты работы полезны для участников оптового рынка при анализе механизма УС и принятии решения об участии в данном механизме.

Литература

1. **Презентация «СО ЕЭС»:** «О механизме управления спросом на электроэнергию. Пилотный проект по вовлечению потребителей розничного рынка электроэнергии в управление спросом на электроэнергию. Методы контроля исполнения обязательств по разгрузке».
2. **Постановление Правительства №461:** «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации для определения основных положений, регулирующих оказание на оптовом рынке электрической энергии и мощности услуг по управлению изменением режима потребления».

*Н.С. Давыдович, студ.; И.П. Соболева, соиск.;
рук. С.И. Ножко, к.т.н. (БрГУ, Братск)*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СУЩЕСТВЕННОМУ СНИЖЕНИЮ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ НА АЛЮМИНИЕВОМ ЗАВОДЕ

На алюминиевом заводе для безопасного проведения ремонтных работ (исключения поражения электрическим током персонала) на группе электролизеров снижалась сила тока со 141 кА до 110 кА. Авторами была подготовлена программа эксперимента, в рамках которого оценивалось изменение энергетических характеристик на группе экспериментальных электролизеров, также авторами проводился учет технологических нарушений на электролизерах до эксперимента, во время его проведения и после его завершения.

Эксперимент проводился в будние дни в течение стандартной восьмичасовой рабочей смены, производилось снижение мощности на 22%.

В результате проведенного эксперимента на группе опытных электролизеров не отмечается негативная динамика по температуре электролита и выходу слоений анода (рис. ниже).



В пересчете на электролизное производство Братского алюминиевого завода, возможное снижение нагрузки масштабируется в 180–200 МВт.

Выводы. Проведенный на алюминиевом заводе эксперимент показал принципиальную техническую возможность использования алюминиевого завода в ценозависимом энергопотреблении в России.

Литература

1. Зенкин Е.Ю., Ножко С.И., Соболева И.П., Дацюра С.В. Экологические перспективы ценозависимого потребления электроэнергии // Энергетическая политика. 2022. № 2 (168). С. 18–25.
2. Дацюра С.В., Ножко С.И., Соболева И.П. Перспективы ценозависимого энергопотребления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 46–52.

Секция 56

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Power supply

Председатель секции: к.т.н., доцент Шведов Галактион Владимирович

Секретарь секции: Королева Елизавета Сергеевна

А.С. Котов, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 6–20 КВ, ПРОХОДЯЩИХ В ЛЕСНЫХ МАССИВАХ

До 30% всех отключений воздушных линий (ВЛ) 6–20 кВ в распределительных сетях связано с падением деревьев [1].

В работе [2] выполнены расчёты динамических нагрузок на провод ВЛ 6–20 кВ при падении дерева с разных расстояний от линии. Выявлено увеличение нагрузки при увеличении расстояния от дерева до проводов вплоть до превышения разрывной прочности СИП-3, в связи с этим предлагается сузить просеку для ВЛ. Предложенная модель рассматривает падение только в центр пролёта, чтобы учесть реальное положение точки соприкосновения, авторами создана математическая модель, позволяющая рассчитывать воздействие дерева при произвольном месте падения (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость нагрузки, создаваемой падающим деревом, в разных местах пролёта, в зависимости от расстояния до ВЛ

Это позволяет как уточнить результаты работы [2] и кроме решения о необходимости снижения ширины просек ВЛ 6–20 кВ разработать новые технические решения по конструктиву этих ВЛ, проходящих в лесных массивах.

Литература

1. Герасимов, А. Расчистка и расширение просек ВЛ: планирование и контроль в современных условиях. ОАО «МРСК Центра» / А. Герасимов, П. Козыренко // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2015. — № 3(30). — С. 88–90.
2. Гвоздев Д.Б., Иванов Р.В., Болонов В.О., Тульский В.Н., Торохтунов А.П. Оценка повреждаемости линий электропередачи напряжением 6–20 кВ в лесной местности, вызванной падением деревьев на различном удалении от провода // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2025. — № 4 (91). — С. 82–90.

Е.А. Осипов, студ.; рук. Е.Н. Рыжкова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЯ АЭРОПОРТА

Воздействие молнии, несущей импульсные токи в сотни килоампер, создает прямую угрозу безопасности людей, целостности зданий и бесперебойной работе критически важного оборудования аэропорта. Ежегодный материальный ущерб и человеческие жертвы подчеркивают необходимость разработки высоконадежных комплексных систем молниезащиты для объектов повышенной ответственности.

Проектирование выполнено с учетом анализа требований отечественных нормативных документов (СО 153-34.21.122-2003) и международного риск-ориентированного подхода (ГОСТ Р МЭК 62305). Для объекта аэропорта применена комбинированная система внешней молниезащиты, интегрированная с архитектурными элементами здания (молниеприемная сетка, использование каркаса в качестве токоотводов), и комплексная внутренняя защита.

Автором проведен расчет и проектирование системы молниезащиты административного здания аэропорта, включая:

- определение категории молниезащиты (II, надежность 0,95);
- разработка комбинированного контура заземления (28 вертикальных электродов, полоса 50×5 мм);
- интеграция систем внешней и внутренней молниезащиты через основную и дополнительные системы уравнивания потенциалов (ОСУП и ДСУП).

Разработанные решения обеспечивают высокий уровень защиты от прямых и вторичных воздействий молнии, что гарантирует бесперебойность работы аэропорта. Методология проекта, основанная на интеграции нормативных баз и применении ВМ, может быть тиражирована для других административных объектов инфраструктуры. Регулярный мониторинг и обслуживание системы являются залогом ее долговечности и эффективности.

Литература

1. ПУЭ 7 — «Правила устройства электроустановок, 7-е издание 2003 г.».
2. СО 153-34.21.122-2003 — «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций».
3. ГОСТ Р МЭК 62305-2010 — «Менеджмент риска защита от молнии».
4. А.А. Федоров и Г.В. Сербиновский — Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети. 2-е изд. — М.: Энергия, 1980. — 576 с.

*К.М. Ефремова, студ.;
рук. Г.В. Шведов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

В современных условиях динамичного развития электроэнергетики особую значимость приобретает вопрос актуализации руководящих документов [1, 2], используемых при определении расчётной нагрузки и проектировании системы электроснабжения, поскольку они не обновлялись с 1990-ых годов.

В качестве исходных данных использовались фактические значения объёма электропотребления 19 торговых центров, 8 поликлиник и 13 учебных учреждений за период 2022–2024 год. Далее приведены факторы, изменяющие привычные паттерны электропотребления. Массовое использование мощных систем кондиционирования смещает пик нагрузки на летний период. Работа учебных учреждений и поликлиник по выходным дням снижает традиционный провал нагрузки в субботу и воскресенье. Появление фуд-корт, кинотеатров, диагностических аппаратов (МРТ, КТ) ит-полигонов, компьютерных классов создаёт дополнительную нагрузку. Большое разнообразие среди однотипных общественных зданий влияет и на коэффициент одновременности.

Для понимания современных тенденций электропотребления проведено исследование, которое включает в себя: анализ коэффициентов одновременности максимумов нагрузок, недельных графиков нагрузки и периодов максимального электропотребления. Пример зависимости возможного диапазона коэффициента одновременности (КО) от числа потребителей для поликлиник представлен в таблице.

Число потребителей	2	3	4	5	6	7	8
Максимальный/ минимальный КО	0,991/ 0,841	0,981/ 0,771	0,972/ 0,783	0,965/ 0,795	0,958/ 0,818	0,934/ 0,844	0,877

В дальнейшем представляет интерес произвести сопоставление коэффициентов совмещения максимумов нагрузки и полученных коэффициентов одновременности, а также выявить закономерности в суточных графиках нагрузки.

Литература

1. Свод правил. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. СП 256.1325800.2016. — М.: Стандартинформ, 2017 — 84 с.
2. Инструкция по проектированию городских электрических сетей (с изменениями и дополнениями от 29 июня 1999 г.). РД 34.20.185. — М.: Энергоатомиздат, 1995 — 94 с.

М.А. Шах, аспирант; рук. Г.В. Шведов, доцент (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОКУПАЕМОСТИ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Неравномерность суточных графиков нагрузки остаётся одной из ключевых проблем современной энергосистемы, приводящей к увеличению затрат на покрытие пиковых мощностей, повышению требований к резервированию мощности и снижению эффективности использования оборудования энергосистемы [1]. Одним из технологически эффективных способов решения проблемы является применение систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), позволяющих перенести часть потребления из высоконагруженных периодов в ночные часы и тем самым снижать пиковую нагрузку.

Использование СНЭЭ обеспечивает сглаживание графика нагрузки, уменьшая необходимую величину максимальной мощности и снижая нагрузку на электрические сети. В пилотных проектах применение накопителей демонстрирует ощутимое сокращение пикового потребления, что потенциально может снизить операционные расходы энергокомпаний и повысить устойчивость энергосистемы.

Однако в условиях действующей тарифной политики в Российской Федерации установка СНЭЭ остаётся экономически нецелесообразной для большинства потребителей. Разница в стоимости электроэнергии между дневными и ночными часами недостаточна для формирования положительного денежного потока, а оплата мощности в тарифах для населения отсутствует [2].

Отсутствие механизмов окупаемости приводит к тому, что внедрение СНЭЭ осуществляется преимущественно в пилотных или инвестиционно поддерживаемых проектах, не имея условий для массового распространения.

Для повышения экономической привлекательности накопителей требуется разработать новые механизмы окупаемости СНЭЭ. Результаты исследования будут использованы для создания тарифных и рыночных стимулов применения накопитель, что позволит увеличить их экономическую эффективность.

Литература

1. **Г.В. Шведов.** Системы электроснабжения: учебник / М.: Издательство МЭИ, 2018. — 312 с.
2. **П.В. Илюшин.** Механизмы окупаемости инвестиций в системы накопления электрической энергии при их использовании для снижения пиковых нагрузок и затрат на мощность // Релейная защита и автоматизация, 2021 №1(42). С. 12–20.

*Е.Р. Саитгалина, студ.;
рук. О.А. Васильева, к.т.н., доц. (СПбПУ, Санкт-Петербург)*

РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Быстрые изменения напряжения в системах электроснабжения, вызываемые резкими колебаниями нагрузки, пусками мощных двигателей [1], сбоями на линиях электропередач, приводят к отказам техники с микропроцессорным управлением, в связи с чем являются актуальной проблемой для потребителей и электросетевых компаний, в которые поступают претензии по факту таких отказов.

В работе представлены результаты исследований событий быстрых изменений напряжения — RVC (rapid voltage change). Выполнен анализ влияния RVC-событий на работу электроприемников, систематизированы требования отраслевых нормативных документов и государственных стандартов к методам измерений и пороговым значениям событий RVC [2, 3].

Рассмотрены события RVC, зафиксированные на питающем вводе 0,4 кВ предприятия в Санкт-Петербурге, выполнено моделирование событий на испытательном стенде с применением калибратора переменного тока «Ресурс-К2». На основе данных осциллограмм, регистрируемых по условиям возникновения событий RVC, разработан программный модуль в Matlab для изучения и анализа параметров таких событий (времени начала, длительности, максимального $\Delta U_{\max} \%$ и установившегося отклонения напряжения $\Delta U_{ss} \%$). Значения параметров, рассчитанные в программном комплексе, соответствуют результатам измерений, выполненных специализированными микропроцессорными устройствами BINOM3, обеспечивающими класс А характеристик процесса измерений по требованиям [2].

Литература

1. **О.А. Васильева, М.А. Шахова, В.В. Симонов, А.А. Кокулин, Е.М. Фрейцис.** Опыт практической реализации концепции цифровой трансформации на учебно-экспериментальной ТЭЦ с использованием измерительных приборов BINOM3 // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2021. № 5(142). — С. 42–52.
2. **ГОСТ ИЕС 61000-4-30-2017.** Электромагнитная совместимость. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии.
3. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Д.В. Чулков, студ.; рук. А.С. Соловьева, ассист. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕРВАЛА ОСРЕДНЕНИЯ НА МАКСИМУМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Проектирование и эксплуатация объекта городских электрических сетей не может быть выполнено без вычисления его расчетной электрической нагрузки. Под расчетной электрической нагрузкой понимают максимальную среднюю нагрузку за интервал времени $3T_0$ в течение рассматриваемого периода времени T [1]. Если расчетная нагрузка превышена по сравнению с фактической, то это приводит к необоснованному удорожанию проектируемой системы. Напротив, занижение нагрузки может вызвать увеличение потерь электроэнергии в системе и регулярные перегрузки, что сокращает срок службы оборудования.

Грамотный выбор интервала времени осреднения очень важен, так как от этого зависит, нужно ли нам анализировать кратковременные или продолжительные нагрузки.

В качестве рассматриваемого объекта выбрана однокомнатная квартира и сняты её показания потребленной электроэнергии с осреднениями за 5 минут. Расчет произведен в программе АРМН (Автоматизированный расчет максимума средних нагрузок).

В качестве примера в таблице 1 приведены результаты исследования для одних суток, по которым видно, что с увеличением интервала осреднения значение максимальной нагрузки уменьшается в разы.

Таблица 1. Значения максимумов средней нагрузки однокомнатной квартиры для 11.06.2021

Интервал осреднения $3T_0$	Максимальное значение W , Вт·ч	P_{max} , Вт
15	275	1100
30	379	758
90	556	370,6

В результате исследования было определено, что с изменением выбора интервала осреднения меняется не только величина максимальной электрической нагрузки за рассматриваемый интервал времени, но и её временной интервал наступления. Определение оптимального интервала осреднения также имеет важное экономическое значение, так как это влияет на выбор сечений кабелей и выбор мощности трансформаторов.

Литература

1. Шведов Г.В. Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Е.А. Потапова, студ.;

рук. О.А. Васильева, к.т.н., доц. (СПбПУ, Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗАВОДА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ

Увеличение применения преобразовательных устройств и других нелинейных нагрузок приводит к необходимости более детального исследования проблемы несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения и установления критериев распределения ответственности между потребителем и сетевыми организациями за внесение искажений в электрическую сеть [1]. В этой связи с 01 августа 2025 г. введен в действие ГОСТ Р 72176-2025, который устанавливает нормы гармонических составляющих тока в присоединениях потребителя электрической энергии мощностью 670 кВт и более к сетям среднего и высокого напряжения.

В работе представлены результаты исследований качества электрической энергии на питающем вводе 10 кВ системы электроснабжения завода по производству лекарственных форм. Контроль выполнения требований ГОСТ 32144 выявил отклонения коэффициентов гармоник напряжения 3, 9, 17 и 19-го порядков от нормативных значений. При этом значения гармоник тока нагрузки 3-го и 9-го порядков не превышали норм, установленных в ГОСТ 72176, что свидетельствует о расположении источника гармонических помех на этих частотах на стороне сетевой организации. Анализ осциллограмм показал, что источником гармонических искажений явилось однофазное замыкание на землю в питающей электрической сети продолжительностью 85 минут. Нормы эмиссии гармоник тока на частотах более 13-го порядка стандартом не устанавливаются и в работе не рассматривались.

Сделан вывод, что СИ ПКЭ, сертифицированные по параметрам тока и напряжения в соответствии с классом А по ГОСТ IEC 61000-4-30, соответствуют метрологическим требованиям ГОСТ Р 72176-2025, и их данные могут быть использованы для анализа качества электроэнергии с учетом нормативных ограничений гармоник тока и определения стороны, ответственной за реализацию мероприятий по компенсации сверхнормативных электромагнитных помех.

Литература

1. **Васильева О.А., Попов М.Г., Шахова М.А., Валеева Е.Ю., Марковская Ю.А.** Анализ качества электрической энергии в системе электроснабжения с преобладающей импульсной нагрузкой // *Электричество*. 2024. № 2.

*Д.О. Позин, асп.; рук. А.В. Варганова, к.т.н., доцент
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗКОПРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Внедрение источников распределенной генерации (РГ) является актуальной задачей в рамках энергетической стратегии развития РФ [1]. Активная интеграция генерирующих установок малой мощности в энергоемкие промышленные системы электроснабжения, в которых преобладают нагрузки с резкопеременным характером, негативно влияют на режимы работы самих источников РГ.

Исходя из этого, возникает задача имитационного моделирования таких систем, с целью проведения анализа режимов работы источников РГ, работающих на резкопеременную нагрузку.

Проведенный статистический анализ эксплуатационных режимов главной понизительной подстанции крупного промышленного предприятия выявил неодназначное описание нагрузок электроустановки [2].

В данной работе представлена математическая модель нагрузки, в виде системы уравнений по активной и реактивной мощности. Данная модель предусматривает изменение шага нагрузки как по активной, так и по реактивной мощности, что позволяет анализировать состояние системы в условиях резких изменений параметров сети. Полученная модель позволит разработать алгоритм, определяющий рациональное количество и оптимальную мощность генерирующей установки с учетом их устойчивости. Разработанная имитационная модель повышает точность расчетов установившихся и переходных режимов.

Актуальность данной работы обусловлена ростом доли резкопеременных нагрузок в промышленных энергокомплексах и, как следствие, дефицита мощности, который целесообразно решать за счет установки источников малой генерации.

Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. 12.04.2025 [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/>
2. Позин Д.О., Варганова А.В., Патшин Н.Т., Абдулвелеев И.Р. Статистический анализ резкопеременных нагрузок в промышленных системах электроснабжения // Электротехнические системы и комплексы. 2025. № 3(68). С. 49–55.

*М.С. Козлов, асп.; рук. А.В. Варганова, к.т.н., доц.
(МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск)*

САПР ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОУЗЛОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Увеличение производственных мощностей на промышленных предприятиях связано с повышением дефицитных узлов по активной мощности. Установка источников малой генерации позволяет снижать нехватку мощности за счет сравнительно быстрого ввода в эксплуатацию, небольших сроков окупаемости. Активное внедрение источников малой генерации в условиях новых или реконструируемых систем электроснабжения приводит в решении предпроектных задач в части определения их оптимального места установки [1], а в условиях эксплуатации — поиску эффективных режимов загрузки по активной мощности с учетом тепловой нагрузки.

Данная работа направлена на решение предпроектных и проектных задач, связанных с реконструкцией или проектированием новых энергоузлов с газопоршневыми, газотурбинными, парогазовыми установками.

Разрабатываемая САПР позволяет определять оптимальное число и мощность генераторов по заданной нагрузке, срок окупаемости проекта с учетом инфляции на энергетические ресурсы и оборудование, а также осуществлять разработку проектной документации: однолинейная схема, спецификации, опросные листы на оборудование. Отличительной чертой разрабатываемого программного обеспечения является ориентирование на ускорение процессов проектирования за счет использования заранее заданных сценариев, что обеспечивает сокращение ошибок, увеличение объема времени на принятие нестандартных решений.

Результаты решения предпроектных задач позволяют заказчику определить экономически целесообразный вариант по реконструкции или проектированию новой подстанции 6 (10) кВ/ 0,4 кВ с источниками малой генерации. САПР предназначена для электротехнических отделов проектных организаций.

Литература

1. **Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А.** Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 68–72.
2. **Варганова А.В.** Комплексная модель системы электроснабжения с источниками малой генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 69–71.

*С.С. Соловьёв, студ.;
рук. А.Н. Назарычев, д.т.н., проф. (СПГУ, Санкт-Петербург)*

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Существующие системы мониторинга технического состояния (ТС) нацелены на совершенствование систем диагностики электрооборудования. [1] Однако системы контроля ТС электрооборудования являются дорогостоящими, и их применение для конкретного оборудования требует обоснования. Одним из решений данной проблемы является определение вклада отдельного оборудования в надежность системы. Однако данные вклады рассчитываются на основе нормативных значений показателей надежности, что приводит к значительному расхождению фактических значений с расчетными. Для ликвидации данного недостатка необходимо рассчитывать вклад электрооборудования в надежность системы с учетом ТС. Это позволит разрабатывать рекомендации по реализации технических воздействий для наиболее важного оборудования не только на этапе проектирования, но и на действующих объектах.

В результате ранее проведенных исследований был разработан программный комплекс для оценки надежности систем электроснабжения со сложной топологией с учетом ТС на основе логико-вероятностного метода [2]. В рамках данного исследования данный комплекс дополнен расчетом вкладов отдельного электрооборудования в надежность системы с учетом ТС. Это позволило создать ранжированные списки оборудования для реализации технических воздействий и применения дорогостоящих систем мониторинга ТС.

Литература

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования, Иваново, 2005.
2. Соловьёв С.С., Назарычев А.Н., Бабанова И.С. Автоматизация оценки структурной надёжности систем электроснабжения с учётом технического состояния электрооборудования // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики: материалы девяносто седьмого заседания Международного научного семинара, Новосибирск, 06–12 июля 2025 г. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2025. С. 304–313.

*Р.Д. Лизогуб, П.А. Балаев, студ.;
рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ», Москва)*

СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ШКАФАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Для решения проблемы провалов напряжения на нефтегазовых предприятиях используются системы компенсации провалов напряжения (СКПН) [1], оснащенные различными накопителями энергии, такими как аккумуляторные батареи, суперконденсаторы и маховики.

Суперконденсаторы обеспечивают мгновенный отклик и высокую удельную мощность, однако обладают низкой энергоёмкостью и предназначены для кратковременной поддержки нагрузки. Маховики характеризуются очень быстрым откликом и высокой мощностью, но используются преимущественно для краткосрочного хранения энергии — от секунд до минут, что делает их эффективными при компенсации кратковременных провалов напряжения, но не при длительных режимах автономной работы [2]. Их недостатком является риск искрообразования при механическом повреждении [3].

На нефтегазовых предприятиях необходимо учитывать особенности эксплуатации оборудования, содержащего СКПН, в условиях взрывоопасных сред. Одним из предлагаемых решений для защиты СКПН в таких условиях является размещение системы в шкафу управления с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка «d»» [4]. Этот вид защиты предполагает, что возможный взрыв происходит внутри оболочки, а ее конструкция предотвращает его распространение во внешнюю взрывоопасную среду. Важно, что изоляция не требует полной герметичности, что позволяет сохранять высокую степень защиты при оптимальных эксплуатационных характеристиках. Обеспечение защиты производится путем использования качественных материалов, отсутствием трещин и дефектов, а также точным соблюдением технологий монтажа, включая контроль за низкой шероховатостью фланцевых соединений.

Литература

1. **Ключарев Д.В.** Разработка системы компенсации искажений напряжения / Д.В. Ключарев, И.В. Швыров, Л.А. Князев // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2021. — № 5(68). — С. 78–82.
2. **Применение СНЭ в России: возможности и барьеры: эксперт.-аналит. отчет / ИЦ EnergyNet;** под ред. Д.В. Холкина, Д.А. Корева. — Москва, 2019. — 156 с.
3. **ГОСТ Р 58092.5.1-2018.** Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Безопасность систем, работающих в составе сети. Общие требования.
4. **Солнцев В.Б.** Взрывозащита электрооборудования во взрывоопасных газовых средах. Ознакомительное пособие / В.Б. Солнцев — «Автор», 2021.

Ю.Д. Шурова, асп.; рук. Д.Б. Гвоздев, д.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Технологические нарушения по причине неблагоприятных погодных условий оказывают значительное влияние на показатели надежности, приводя к росту продолжительности отключений и созданию угрозы стабильности энергоснабжения (рис. 1). Степень чувствительности объектов энергетики во многом зависит от характера опасных природных явлений (ОПЯ), технического состояния распределительной сети (РС) и др. Основная доля аварий приходится на воздушные линии электропередачи 0,4–20 кВ (рис. 2).



Рис. 1. Основные причины технологических нарушений

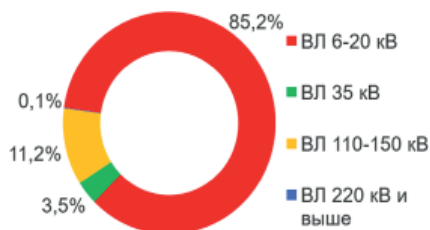


Рис. 2. Повреждаемость на 100 км ВЛ с разбивкой по уровням напряжения

При решении проблемы определения необходимого количества сил и средств, направленных на повышение эффективности аварийно-восстановительных работ и ускорение сроков восстановления электроснабжения потребителей необходимо учитывать техническое состояние оборудования линий электропередачи. В статье [1] предлагается к применению система метеорологического мониторинга, предназначенная для наблюдения за погодными условиями и прогнозирования ОПЯ. Однако, данная система не учитывает техническое состояние оборудования [2].

Цель работы — разработка методики оценки технического состояния оборудования РС и прогнозирования последствий отказов и рисков нарушения электроснабжения потребителей. Полученные результаты исследования могут быть использованы в управлении ликвидацией аварийных ситуаций в распределительной электросетевой компании.

Литература

1. Гвоздев Д.Б., Пушкарский Д.А., Магон А.И. Предиктивное управление ликвидацией аварийных ситуаций в ПАО «Россети Московский регион» // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2023. — № 4 (79).
2. Басманов В.Г. Выбор периодичности оценки технического состояния воздушных линий 6–10 кВ по результатам статистических исследований их надежности // Проблемы региональной энергетики. 2020. №4 (48).

*Е.С. Астахов, И.С. Плыгалин, А.А. Пахмутова,
Д.П. Яковлев, студенты;
рук. А.И. Коваленко, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА СПОСОБА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИИ

В условиях старения фондов и дефицита инвестиций традиционная система планово-предупредительных ремонтов в электроэнергетике уступает место риск-ориентированному подходу, ориентированному на техническое состояние оборудования. Однако на практике отсутствуют алгоритмы, позволяющие автоматически формировать оптимальные планы ТОиР на основе оценки рисков.

В работе предложен способ автоматической оптимизации годового плана ТОиР, минимизирующий суммарный риск отказа оборудования при ограниченном бюджете и требуемом уровне надёжности сети. В качестве ключевых показателей используются индекс технического состояния, вероятность отказа, потенциальный ущерб, а также прогнозные значения SAIDI и SAIFI [1]. Задача сформулирована как условная оптимизация: найти комбинацию технических воздействий для каждой единицы оборудования, при которой суммарный риск минимален, а затраты не превышают заданного бюджета. Учитывается, что за год к одному элементу может быть применено не более одного вида воздействия.

Эксперименты на упрощённых схемах на основе IEEE-14 показали, что генетический алгоритм (ГА) обеспечивает качество решения, сопоставимое с полным перебором, но при значительно меньших временных затратах. Это делает ГА применимым для крупных энергосистем.

Разработанный подход позволяет не только оптимизировать годовой план, но и строить многолетние стратегии ТОиР итеративно: состояние сети после каждого года используется как исходное для следующего. Моделирование на 30-летнем горизонте показало, что при недостаточном бюджете сеть деградирует, тогда как при адекватном финансировании достигается динамическое равновесие и стабильное техническое состояние.

Таким образом, предложенный метод на базе ИИ обеспечивает переход от субъективного планирования к объективной, количественно обоснованной стратегии ТОиР, повышая надёжность и экономическую эффективность эксплуатации электрооборудования.

Литература

1. Колобродов Е.Н., Волошин А.А., Коваленко А.И., Николаев А.С. Уточнённый алгоритм прогнозирования индекса технического состояния трансформатора для автоматизации планирования ТОиР // Электрические станции. — 2023. — № 9(1106). — С. 59–64.

И.С. Назаров, студ.; рук. Г.В. Шведов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ С ПОВЫШЕННЫМ ЧИСЛОМ КОНДИЦИОНЕРОВ

В современных условиях доля жилой нагрузки в мегаполисах увеличивается. Предполагается, что максимум нагрузки жилых зданий для средней полосы приходится на зимний период. Однако за последние десятилетия произошли климатические изменения (участвовавшие периоды летней жары) и массовое распространение систем кондиционирования воздуха в многоквартирных жилых домах. В таких случаях пиковая нагрузка, обусловленная одновременной работой большого числа кондиционеров, начинает конкурировать с традиционным зимним пиком.

В качестве исходных данных использовались показания интеллектуальной системы учёта многоквартирного жилого дома с увеличенным числом систем кондиционирования в г. Москве за период с 1 июля 2024 года по 10 марта 2025 года.

Пример динамики электропотребления одной из секций жилого дома (рис. 1) демонстрирует то, что годовой максимум наблюдается 2 июля и превышает значение зимнего максимума в 1,3 раза. При анализе метеорологического фактора было выявлено, что в Москве в 2024 году была аномально жаркая погода в период 1–5 июля и 13–16 июля (днём температура была более 29°C, ночью не опускалась ниже 23°C). Такое изменение температуры стало причиной массового использования кондиционеров, что и оказалось решающим фактором на такое изменение электропотребления.

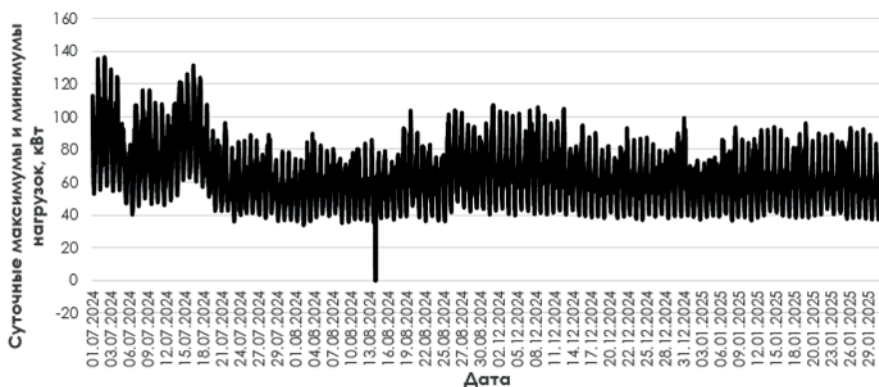


Рис. 1. Структура электропотребления секции жилого дома летом и зимой

В работе будет проанализировано влияние аномально жаркой погоды на динамику электропотребления в дневные и ночные часы.

В.Д. Зорина, студ.; рук. Г.В. Шведов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ

За последние десятилетия в связи с интенсивной электрификацией домашних хозяйств произошли существенные изменения в структуре и количестве бытовых приборов. Однако большинство научно-технической литературы продолжает опираться на данные, соответствующие периоду с более простой и предсказуемой нагрузкой квартир [1].

Для получения актуальных данных о современном составе кухонной электротехники и режимах её использования было проведено анкетирование жителей многоквартирных домов г. Москвы. После обработки полученных данных было установлено число наиболее популярных кухонных электроприборов в пересчете на 100 семей: кухонная плита — 94 шт.; духовой шкаф — 75 шт.; микроволновая печь — 77 шт.; электрический чайник — 85 шт.

Значительный вклад в нагрузку квартиры вносит мощный электроприбор — кухонная электроплита. Фактическое энергопотребление разных типов плит с сопоставимыми паспортными мощностями на одни и те же операции различается. На примере кипячения 2-х л. воды для индукционной плиты затраты составляют порядка 0,3 кВт·ч, для стеклокерамической — 0,6 кВт·ч, для плиты с ТЭН — 1,2 кВт·ч. При массовом переходе на индукционные плиты величина пиковой нагрузки на электросеть останется прежней, но длительность этой нагрузки сократится. В настоящее время также наблюдается рост использования мультиварок, микроволновых печей и других электроприборов, работающих короткими циклами и способных включаться одновременно. Данные факторы ведут к изменению характера нагрузки: увеличивается доля импульсных включений и повышается вероятность временного наложения пиков от отдельных устройств.

На фоне роста насыщенности квартир кухонными электроприборами и распространения более энергоэффективных технологий становится актуальной корректировка исходных данных для расчёта нагрузок МКД.

Литература

1. **Г.А. Парфенов, Г.В. Шведов.** Влияние современных электроприемников на электропотребление квартиры // Энергосбережение теория и практика: труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 19–23 октября 2020 года. — Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2020. — С. 158–162.

Секция 58
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ
Electric power stations

Председатель секции: к.т.н., доцент Монаков Юрий Викторович

Секретарь секции: Посохов Николай Олегович

М.И. Домрачева, А.С. Просолов, И.С. Ольшанов, студ.;
рук. А.А. Антонов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ *EMTP* ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРОСКОВ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Точное моделирование переходных процессов при включении силовых трансформаторов критически важно для корректной работы релейной защиты и коммутационных аппаратов. Эффективным инструментом анализа является ПК *EMTP* [1], позволяющий учитывать нелинейные характеристики, насыщение магнитопроводов и остаточную намагниченность.

В рамках исследования была разработана модель включения силового трансформатора под напряжение на холостой ход, построенная на основе данных лабораторной работы. В модель были интегрированы параметры энергосистемы, трансформатора с учетом характеристики намагничивания магнитопровода. Использование ПК *EMTP* позволило провести анализ зависимости бросков тока намагничивания от угла включения, остаточной намагниченности и нагрузки трансформатора и сделать следующие выводы: максимальный бросок тока намагничивания наблюдается при включении трансформатора в момент максимума периодической составляющей магнитного потока; остаточная намагниченность магнитопровода существенно увеличивает амплитуду токов включения, вызывая асимметрию фазных токов и явление «отрыва нуля».

Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность применения ПК *EMTP* для образовательных и исследовательских целей. В частности, модель, разработанная на основе реальных параметров оборудования, может быть использована при выполнении лабораторных работ студентами, изучающими дисциплины «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» и «Токи короткого замыкания». Также ПК *EMTP* эффективен для научных исследований, выполняемых аспирантами.

Литература

1. W. Scott Meyer, Tsu-huei Liu. Electro-Magnetic transients Program (EMTP). Theory book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon. 1995. 483 p.

А.Д. Макарова, Д.А. Валеев, студ.;
рук. А.А. Антонов, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПЕРЕХОДНЫМ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИМСЯ НАПРЯЖЕНИЯМ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проверке выключателей 220 кВ на стойкость к переходным восстанавливающимся напряжениям (ПВН) на существующем участке электроснабжения от ПС 220 кВ Могоча до ПС 220 кВ Ерофей Павлович использованы ручные расчеты согласно упрощенной методике [1], в результате которых выявлено превышение уровней ПВН над нормируемыми ГОСТ Р 52565 [2]. С целью уточнения выводов о проверке выключателей на ПВН в данной работе использовано математическое моделирование с применением специального программного обеспечения.

Целью работы является проверка выключателей на ПВН с помощью математического моделирования участка электрической сети в программном комплексе *ЕМТР* по критерию [2]. Для этого была разработана расчётная математическая модель участка сети в программном комплексе *ЕМТР*, включающая 6 подстанций напряжением 220 кВ, проведено моделирование ПВН при трёхфазных и однофазных коротких замыканиях (КЗ). Верификация модели выполнена путем сопоставления уровней токов КЗ в расчетной модели с токами КЗ в энергосистеме, отличие токов КЗ не превышает 5%.

С помощью разработанной математической модели были рассчитаны фактические кривые ПВН для трехфазного и однофазного КЗ, а также при расположении точки КЗ на шинах подстанции и за выключателем, которые существенно отличаются от кривых ПВН, полученных по упрощенной методике [1]. В результате уточненной проверки отключающей способности выключателей по параметрам ПВН не выявлено случаев несоответствия выключателей фактическим ПВН.

Практическая ценность работы заключается в том, что показанный принцип математического моделирования позволяет наиболее точно выполнять проверку выключателей на соответствие ПВН.

Литература

1. **Электрическая** часть станций и подстанций: учеб. для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
2. **ГОСТ Р 52565-2006.** Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. М.: Стандартинформ, 2006.

М.М. Комладзе, студ.; рук. Е.В. Шелковой, к.т.н., ст.преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СХЕМНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И РЕЖИМНЫХ КАРТ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ В ИЗОЛИРОВАННОМ ЭНЕРГОУЗЛЕ

Гибридные энергокомплексы широко используются в изолированных энергоузлах Арктики и Дальнего Востока. Объединение элементов электростанций на шине постоянного тока позволяет повысить устойчивость и продолжительность работы с отключенными дизель-генераторными установками. При этом структурная схема таких станций ограничивает выбор ремонтных схем и может приводить к некорректному выбору параметров инверторов для выдачи мощности в сеть [1].

Рассчитаны режимы работы инверторов в нормальной и ремонтной схемах различной конфигурации структурной схемы гибридной электростанции мощностью до 10 МВт с шинами постоянного тока.

В результате показано, что секционирование шин постоянного тока и выбор мощности инверторов связи по максимальной нагрузке позволяет обеспечить надежность выдачи мощности станции.

По итогам обоснована целесообразность разработки типовых решений для выбора структурной схемы гибридной электростанции с шинами постоянного тока и инверторами связи с сетью.

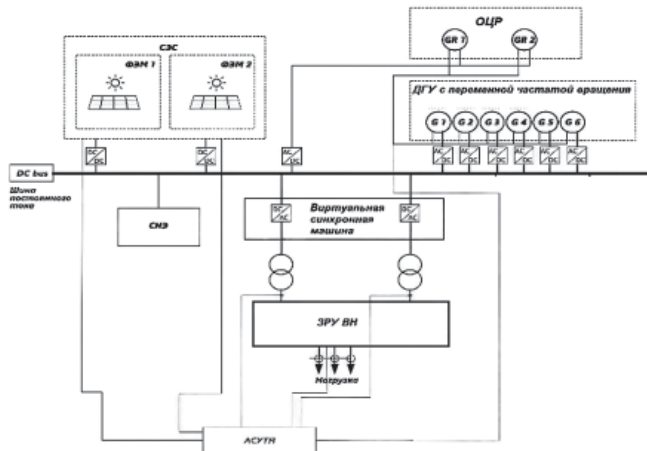


Рис. 1. Принципиальная схема Автоматизированного гибридного энергокомплекса

Литература

1. Шелковой Е.В., Кабанов В.А. — Технологии гибридной генерации для локальной энергетики Дальнего Востока и Арктики М.: ЭНЕРГОЭКСПЕРТ-2024. — № 3. — С. 12–18.

Секция 59
СЕКЦИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Б.К. МАКСИМОВА
«ЭЛЕКТРОФИЗИКА И СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ»
Electrophysics and control systems of electric
power engineering objects

Председатель секции: к.т.н., доцент Арцишевский Ян Леонардович

Секретарь секции: к.т.н., доцент Орлов Александр Васильевич

При поддержке

*Центра НТИ "Технологии транспортировки
электроэнергии и распределенных
интеллектуальных энергосистем"*



ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ
на базе НИУ "МЭИ"

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Д.А. Буданова, студ.; рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

О ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАВИН В КОРОТКИХ РАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

Электрические разряды в коротких (субмиллиметровых) воздушных разрядных промежутках (РП) создаются в генераторах озона с барьерным разрядом, характерны для дефектов твёрдой изоляции высоковольтных устройств [1]. Их изучение требует, математического моделирования [2].

Для этого применяются дрейфово-диффузионные модели разряда [1, 2]. В них в т.ч. задаются начальные распределения концентраций электронов N_e , положительных N_+ и отрицательных N_- ионов. Часто они имеют вид:

$$N|_{t=0} = N_{\max} \cdot \exp\{-[r^2 + (z - z_0)^2 / r_0^2]\}, \quad N_+|_{t=0} = N_-|_{t=0} = N_0$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, $t = 0$ — начальный момент времени, N_0 — фоновая концентрация ионов. В этом случае разряд начинается с появления неоднородности в исходном распределении электронов, которая расположена в точке $x = y = 0$, $z = z_0$, где достигается их максимальная концентрация $N_{\max}$. Величина r_0 определяет скорость спада концентрации при удалении от этой точки. Сочетанию значений r_0 , z_0 , $N_{\max}$ соответствует начальное число электронов n_0 .

В табл. 1 приведены расчётные значения n_0 и критического числа $n_{кр}$ электронов в лавинах [1], полученные в рамках математической модели [2] в РП длиной 0,1 см при $r_0 = 0,0025$ и $0,005$ см, $z_0 = 0,097$ см, $N_{\max} = 10^8$ см⁻³, $N_0 = 10^3$ см⁻³. Средняя напряжённость поля в РП составляет 68 кВ/см. Он заполнен воздухом при нормальных атмосферных условиях.

Таблица 1. Значения начального и критического числа электронов в лавинах

r_0 , см	0,0025	0,0050
n_0	9	58
$n_{кр}$	$1,576 \cdot 10^8$	$2,619 \cdot 10^8$

Из табл. 1 видно, что увеличение r_0 в 2 раза и соответствующий рост n_0 в 6 раз ведут к увеличению критического числа электронов в 1,662 раза. Это делает важным исследование происхождения и параметров начальных лавин, инициирующих разряд в коротких РП.

Литература

1. **Бортник И.М.** Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М: Издательство МЭИ, 2018.
2. **Галимова А.В.** Математическое моделирование электронных лавин в воздухе для уточнения условий лавинно-стримерных переходов / А.В. Галимова, А.А. Белогловский, С.В. Белоусов, Н.А. Лебедева // Промышленная энергетика. 2024. № 4. С. 43–50.

Д.А. Вертогузов, асп.; рук. В.Ф. Лачугин, д.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ 6–35 КВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В интеллектуальных сетях 6–35 кВ для повышения наблюдаемости и управляемости электротехнического оборудования стали внедряться системы связи и микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА). Ранее в распределительных сетях такого напряжения основными защитами являлись токовые защиты с относительной селективностью: максимальная токовая защита, токовая отсечка и защита от однофазных замыканий на землю [1].

Для повышения быстродействия комплекса РЗА в интеллектуальных сетях предлагается применение логической защиты линии (ЛЗЛ). ЛЗЛ по принципу действия является защитой с абсолютной селективностью, что достигается сравнением логических сигналов комплектов со всех концов линии [2]. Аналогичные защиты применяются для защиты сосредоточенного оборудования [3, 4], так как в этом случае применение каналов связи не требуется.

Предполагается, что для правильной работы ЛЗЛ должны использоваться разрешающие и блокирующие сигналы (РС и БС) совместно. В типовых решениях логические защиты используют только один вид сигнала, однако такое решение приводит к неправильной работе при отказе каналов связи. В таких случаях следует использовать орган направления мощности (ОНМ) [4, 5].

В сети с односторонним питанием применение ОНМ должно быть обосновано значительной подпиткой со стороны нагрузки. При отсутствии такой подпитки рекомендуется применять комбинированные ПО напряжения и тока для выявления КЗ. Такие пусковые органы будут формировать РС при возникающих в сети КЗ, кроме тех, от которых срабатывают собственные измерительные органы тока.

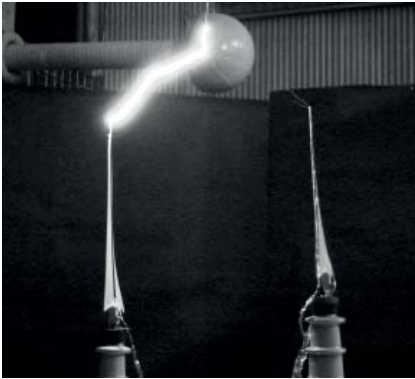
Литература

1. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2010.
2. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.
3. **Маруда И.Ф.** Релейная защита двойной селективности. Логические защиты электрических объектов. Электричество. 2011. № 1.
4. **Гринев Н.В.** Алгоритм встречно-направленной логической защиты шин. Новости электротехники. 2006. № 4.
5. **Емельянец А.Ю., Филин Л.Л.** Быстродействующая логическая защита линий 6–10 кВ, связывающих электростанции промышленных предприятий с энергосистемой. Новости электротехники. 2008. № 5.

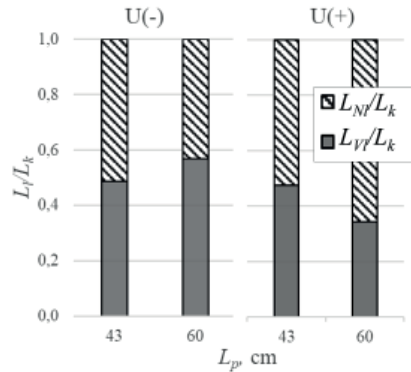
О.В. Егорова, студ.; рук. А.Г. Темников, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЛОПАСТЕЙ ВЭУ

Актуальными являются исследования процессов поражения молнией лопастей ветроэнергетических установок (ВЭУ), роли конкурентных восходящих лидеров в процессе поражения лопастей с разными конфигурациями молниезащиты (МЗ) [1]. Представляются результаты физического моделирования процесса взаимодействия молнии с ВЭУ, включая механизмы образования восходящих лидеров и особенности формирования разряда с использованием ГИН (коммутационный импульс 250/2500 мкс обеих полярностей). Исследовались два варианта МЗ лопастей ВЭУ: ромб на вершине лопасти с токопроводящей лентой (1 на рис. 1а) и металлическая лента на вершине и вдоль кромок лопасти (2 на рис. 1а).



(а)



(б)

Рис. 1. (а) Картина формирования конкурирующих разрядов;
(б) Относительная длина каналов восходящего (L_{VI}) и нисходящего (L_{NI}) лидеров

Результаты показали, что эффективность МЗ существенно зависит от полярности молнии. При отрицательной полярности высоковольтного электрода (ВВЭ) в конкурентной ситуации при разных длинах промежутка практически все удары попадали в вариант 1, при положительной 85% ударов приходилось в вариант 2. При отрицательной полярности ВВЭ с увеличением длины промежутка L_p возрастает длина положительного восходящего лидера L_{VI} (рис. 1б), при положительной полярности происходит обратная ситуация: длина отрицательного восходящего лидера существенно уменьшается. Это различие связано с особенностью формирования лидеров с ВВЭ и с вершин лопастей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций по молниезащите лопастей ВЭУ.

Литература

1. Wang, Yu et al. Influence of blade rotation on the lightning stroke characteristic of a wind turbine // 2019 Wind Energy. 22: 1071–1085.

Л.В. Вайтеленок, асп.;

рук. Р.В. Солопов, к.т.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Смоленске)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ БЛОКИРОВАНИЯ ПРИ КАЧАНИЯХ

Дистанционные защиты, применяемые в сетях с двухсторонним питанием, должны иметь в своем составе устройства блокирования при качаниях (УБК) и асинхронном ходе энергосистем, позволяющие избежать ложного срабатывания защит в этих режимах [1]. Для современных защит на микропроцессорной базе наибольшее распространение получили УБК, реагирующие на приращение токов обратной и прямой последовательности [2]. Причем для повышения чувствительности пусковых органов могут применяться схемы с двойным выделением приращения указанных параметров [2]. При этом значительно усложняется структура пускового органа УБК и защиты в целом.

Для упрощения структуры УБК, реагирующих на приращение токов, в данной работе предлагается рассмотреть в качестве источников информации о первичных токах дистанционные измерительные преобразователи тока (ДИПТ) [3]. Такие преобразователи, во-первых, располагаются на низковольтном потенциале и не имеют дорогостоящей изоляции в отличие от электромагнитных трансформаторов тока, а во-вторых, имеют выходной сигнал, пропорциональный первой производной первичного тока. Следовательно, данный сигнал можно напрямую использовать для организации вышеуказанных УБК.

В работе на основе компьютерного моделирования исследовано применение ДИПТ для УБК с пусковым органом по приращению токов. Выполнено сравнение функционирования предлагаемой структуры УБК с ДИПТ и УБК с сигналами от идеальных трансформаторов тока без насыщения. Получено, что применение ДИПТ позволяет упростить структуру и повысить быстродействие УБК.

Литература

1. **Чернобровов Н.В., Семенов В.А.** Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.
2. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. **Казанский В.Е.** Измерительные преобразователи тока в релейной защите. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 239 с.

А.И. Милосердов, студ.;
рук. Н.Ю. Лысов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ МИКРОРАЗРЯДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ОЗОНАТОРА

По своей структуре барьерный разряд представляет из себя множество микро-разрядов (МР), возникающих в разных точках разрядного промежутка, длительностью 10–30 нс [1]. Знание параметров отдельных МР — формы и амплитуды тока, переносимого заряда — позволит лучше понять физику процессов, происходящих в них, и определить пути дальнейшего развития технологий применения барьерного разряда.

Для измерения параметров отдельных МР предлагается в одном из рабочих электродов сделать отверстия, в которые поместить тонкие стержневые электроды. Радиус кривизны (R) этих электродов должен быть достаточно мал, чтобы на нём одновременно не возникало нескольких МР. Измерительные электроды должны быть изолированы от рабочего электрода диэлектриком (например, полиамид-6 с $\epsilon=3,7$). Геометрия рассматриваемой системы приведена на рис. 1.

С использованием программы численного моделирования было рассчитано влияние параметров измерительного электрода: R и выступа (Δ) относительно плоского электрода на электрическое поле вблизи него. Как видно из рис. 2, значительное уменьшение R приведёт к резкой неоднородности поля, что будет существенно влиять на характер развития МР и результат измерений. На следующем этапе работы запланированы экспериментальные исследования.

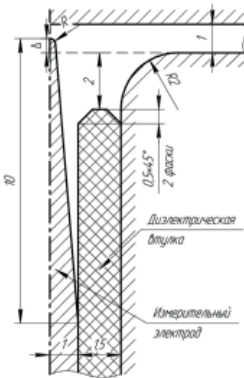


Рис. 1. Геометрия измерительной системы

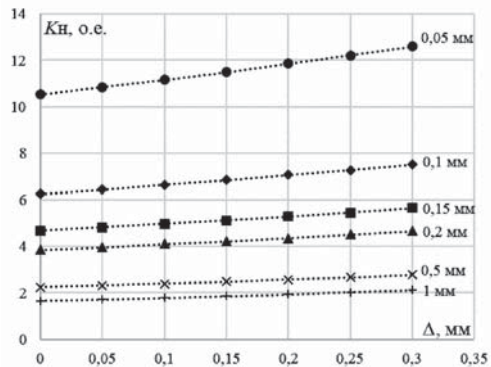


Рис. 2. Влияние R и Δ на коэффициент неоднородности электрического поля

Литература

1. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998, 480 с.

Н.В. Бугунов, студ.; рук. А.И. Коваленко (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА СЦЕНАРИЕВ РЕЖИМОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ РЗА

В современных энергосистемах сложной конфигурации ручной расчет уставок релейной защиты и автоматики не всегда учитывает все возможные режимы работы, что может привести к снижению надежности и селективности защит. Особую сложность представляет учет множества схемно-режимных сценариев, включая изменения топологии, уровней нагрузки и положений регулирования трансформаторов. Автоматизация этого процесса с оптимизацией количества расчетных режимов является актуальной задачей.

В рамках исследования был разработан алгоритм автоматической генерации и фильтрации нагрузочных и аварийных режимов, учитывающий реально возможные состояния сети в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013. Предложенный подход включает эквивалентирование схемы для сокращения числа элементов, учет сезонных уровней нагрузки и положений РПН трансформаторов, фильтрацию режимов по допустимым отклонениям напряжения, а также генерацию аварийных сценариев с учетом критерия N-1.

Апробация алгоритма генерации и фильтрации нагрузочных и аварийных режимов проведена с использованием модели тестовой схемы IEEE 57, разработанной в программно-аппаратном комплексе ЦДЭС.

Реализованный алгоритм позволил сократить количество рассматриваемых режимов с 5776 до 144 для нагрузочных сценариев и уточнить значения токов КЗ для настройки защит. Установлено, что учет реально возможных предаварийных режимов позволяет повысить чувствительность защиты на 22,68%. Полученные результаты могут быть использованы в программных комплексах расчета уставок РЗА для повышения точности и надежности работы защитных устройств. Перспективой является интеграция алгоритма в промышленные системы расчета режимов и управления режимами энергосистем.

Литература

1. Лачугин В.Ф., Волошин А.А. Коваленко А.И. Система автоматизированного расчета параметров срабатывания релейной защиты распределительной сети 6–35 кВ // Электрические станции. — 2023. — № 9. — С. 18–25, 3 рис., 2 табл.

Ц. Се, аспирант; рук. Л.А. Дарьян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

«БЛУЖДАЮЩИЕ ГАЗЫ» В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Объектом исследования являются так называемые «блуждающие газы» в силовых трансформаторах, качественный состав которых идентичен составу газов, образующихся при наличии дефектов электрического или теплового характера. Обнаруживаемые в трансформаторных маслах при отсутствии дефектов «блуждающие газы» формируются в результате низкоэнергетических физико-химических процессов, не связанных с разрушением изоляции. При этом затрудняется интерпретация результатов анализа растворенных в трансформаторном масле газов (АРГ) и возрастает вероятность ложных заключений о состоянии силовых трансформаторов или другого высоковольтного маслонаполненного оборудования. Образование «блуждающих газов» особенно актуально при эксплуатации трансформаторов с маслами новых марок [1–3].

В рамках настоящего исследования проведена систематизация литературных данных и обобщены результаты экспериментов, полученных различными исследователями. Выделены три основных механизма образования «блуждающих газов»: окислительно-радикальные реакции при $T < 120$ °С, кавитационные эффекты, а также разложение пассивирующих присадок. Установлены ключевые факторы, влияющие на образование «блуждающих газов»: тип и структура масла, степень очистки, температура, наличие катализаторов, содержание кислорода.

Показано, что образование «блуждающих газов» представляет собой мультифакторный процесс, в первую очередь зависящий от молекулярной структуры трансформаторного масла.

В настоящее время проводятся экспериментальные исследования с несколькими марками трансформаторных масел, в том числе российского и зарубежного производства с целью выявления исследуемой проблемы. По результатам экспериментальных исследований будет принято решение о необходимости уточнения и дальнейшего развития методик интерпретации результатов АРГ силовых трансформаторов с учётом особенностей трансформаторных масел.

Литература

1. **Duval M.** A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, № 3, 2002, pp. 8–17.
2. **Duval M.** Recent developments in DGA interpretation // CIGRE Technical Brochure No. 296, 2006, pp. 20–25
3. **IEC 60599:2022** Mineral Oil-Impregnated Electrical Equipment in Service — Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis.

С.В. Граудинь, студ.; рук. Д.И. Ковалев, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЯЧЕЕК 35 кВ

Постоянный рост потребляемых мощностей в совокупности с необходимостью оптимизации рабочего пространства и повышения безопасности условий труда являются важными факторами развития распределенной энергетики. Разработка ячеек комплектных распределительных устройств с твердой экранированной изоляцией (КРУТ/SSIS) на напряжение 35 кВ в настоящее время является актуальной задачей, так как на российском рынке не существует аналогов подобного оборудования. Подобная конфигурация ячеек позволяет снизить массогабаритные параметры, повысить безопасность для персонала, упростить эксплуатацию, и делает выгодным применение ячеек в условиях дефицита пространства. Используемые в изоляционных конструкциях материалы выдерживают тяжелые температурные режимы, что делает возможным применение устройств даже в условиях крайнего Севера.

Для определения оптимальных размеров шинного модуля и кабельного адаптера ячейки КРУТ проводились мультифизические расчеты на основе метода конечных элементов. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

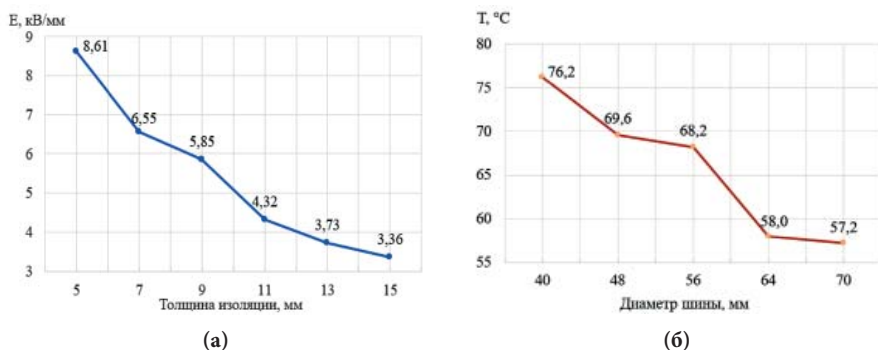


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля в сечении шины ячейки 35 кВ в зависимости от толщины изоляции (а) и зависимость максимальной температуры на шинах ячейки 35 кВ от диаметра токоведущих шин, ток 2500 А (б)

В ходе оптимизации была снижена толщина изоляции до 11–12 мм и диаметр токоведущих шин до 40–48 мм без увеличения рабочих температур устройства. В результате снижение массогабаритных параметров шинного модуля и кабельного адаптера напряжением 35 кВ составило 20–40% относительно стандартных решений.

Работа выполнена в рамках проекта «Оптимизация конструкций высоковольтных ячеек 10–35 кВ» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Литература

1. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 168 с.

*М.В. Базулина, студ.;
рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СТРИМЕРОВ ОТ МЕСТА ИХ ПОЯВЛЕНИЯ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

Стримерный разряд в воздухе применяется в т.ч. в устройствах высоковольтных электротехнологий (ВВЭТ) [1]. В сильном электрическом поле (ЭП) головок стримеров образуются химически активные частицы. В дальнейшем они участвуют, например, в реакциях в воздушной среде, обеспечивая преобразование вредоносных газообразных примесей в менее вредные соединения. ЭП сильнее в головках положительных стримеров, и потому именно они часто применяются в ВВЭТ.

Эта работа продолжает исследования, представленные в [2]. Ниже приведены результаты, полученные в рамках математической модели стримерного разряда [1]. Выполнены расчёты параметров положительных стримерных головок в заполненном воздухе при нормальных условиях разрядном промежутке длиной 0,1 см. В рамках принятой модели полагалось, что развитие стримера инициирует начальная лавина радиусом 0,0025 см. В табл. 1 приведены данные о зависимости максимальной напряжённости ЭП $E_{\max}$ от высоты z_0 этой лавины над анодом.

Таблица 1. Значения максимальной напряжённости электрического поля в положительных стримерных головках от положения начальных лавин

z_0 , см	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
$E_{\max}$, кВ/см	107,7	196,8	199,1	190,3	192,2	183,8	235,9

Из табл. 1 видно, что при $z_0 < 0,03$ см значения $E_{\max}$ резко падают, а при $z_0 > 0,07$ см — растут. Это обусловлено взаимодействием формирующегося стримера с анодом (в первом случае) и катодом (во втором).

Литература

1. **Бортник И.М.** Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М: Издательство МЭИ, 2018.
2. **Галимова А.В.** Оценка в вычислительных экспериментах вариаций параметров положительных стримеров в воздухе / А.В. Галимова, А.А. Белогловский, Т.П. Тарасова // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». I том. Электроэнергетика. Современные инструменты менеджмента. Гуманитарные проблемы развития общества. — Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2023. С. 55–58.

Т.В. Фединский, студ.; рук. А.И. Коваленко (НИУ «МЭИ»)

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАЙОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Современные распределительные электрические сети характеризуются активным внедрением распределенной генерации, включая возобновляемые источники энергии, и частым изменением топологии. Это приводит к значительным изменениям как нагрузочных токов, так и токов короткого замыкания, что может вызывать снижение чувствительности релейной защиты, а также приводить к неселективной работе.

В работе рассматриваются решения, посвященные реализации алгоритмов адаптивного изменения параметров срабатывания релейной защиты. Ключевым является алгоритм реагирования на изменение режима сети, который включает сбор данных о токах в ветвях, идентификацию защит, требующих коррекции уставок, и оперативное изменение групп уставок в терминалах.

Алгоритм включает подсистемы мониторинга связи и состояния терминалов, базу данных рассчитанных групп уставок для различных режимов, а также процедуры быстрого реагирования и передачи уставок.

Предложенный подход позволяет автоматизировать процесс адаптации защит к изменяющимся условиям работы электрической сети, существенно снижая риск неселективной работы релейной защиты высокоавтоматизированных районов электрических сетей.

Литература

1. Булычев А.В., Наволочный А.А., Нудельман Г.С., Онисова О.А. Максимальная токовая защита в системах электроснабжения с распределенной генерацией // Известия вузов. Электромеханика. 2013.
2. Moxley R., Becker F. Adaptive protection — what does it mean and what can it do? // 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). 2018.
3. Релейная защита и автоматика на базе терминалов БЭ2502. Рекомендации по выбору уставок. — ООО НПП «ЭКРА», 2011.
4. СТО 56947007-29.120.70.305-2020 Методические указания для выбора параметров настройки и срабатывания МП устройств РЗА оборудования 6–35 кВ объектов ЕНЭС. ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.
5. Communication networks and systems in substation — Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) — Mapping to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. IEC 61850-8-1. — 2011.
6. ГОСТ Р 54835-2011/IEC 61850-1:2003 «Сети и системы связи на подстанциях». — Москва: Стандартинформ, 2020.

Г.П. Паимцев, асп.; рук. О.С. Белова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКРОВЫХ КАНАЛОВ В ГРУНТЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Подземные волоконно-оптические линии связи традиционно рассматриваются как более устойчивые к грозовым воздействиям, однако исследования последних лет показывают, что электромагнитные импульсы молнии способны проникать в высокоомные грунты и инициировать в них процессы искрения. Индуцированные токи и локальные пробой в объёме грунта создают условия взаимодействия разряда с металлическими элементами подземных кабелей, что может приводить к деградации параметров оптического сигнала [1]. В условиях роста протяжённости и значимости подземных ВОЛС проблема анализа поведения импульсного поля в высокоомных средах становится особенно актуальной, что делает необходимыми экспериментальные исследования процессов искрения и распространения тока в грунте под действием импульсных грозовых разрядов.

Для решения этой задачи был проведён эксперимент на специализированном комплексе «Гроза», позволяющем моделировать искусственные грозовые ячейки и воспроизводить разряды типа «облако–земля». На заземлённом экране размещался диэлектрический сосуд, заполненный стеклянным высокоомным гранулятом, моделирующим грунт. Внутри гранулята располагались два металлических электрода, которые размещались в сосуде раздельно, без механического соприкосновения, что обеспечивало формирование искрового промежутка. Верхний электрод выступал над грунтом и служил молниеприемником. Нижний электрод был заземлен через малоиндуктивный шунт, регистрирующий сигналы при помощи осциллографа. В ходе экспериментов напряжённость поля достигала порядка 20 кВ/см, а токи на нижнем электроде — до 90 А, что свидетельствует о возможности глубокого проникновения импульсного поля в высокоомный грунт и формирования искровых каналов, опасных для металлических оболочек реальных кабелей [2].

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего исследования механизмов искрения, динамики распространения тока и оценки их влияния на параметры сигналов подземных ВОЛС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10223, <https://rscf.ru/project/23-79-10223/>

Литература

1. **Yuan T. et al.** Experimental Study of Electromagnetic Interference from Lightning to Buried Secondary Cables. *Energies*, 2024, 17(15), 3852.
2. **Митрохин В.Е., Осипов В.Е.** Обзор факторов, воздействующих на оптоволоконные линии связи при грозовых разрядах. *ОмГТУ*, 2024, № 3(191).

Е.А. Мартынов, студ.; рук. О.С. Белова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСХОДЯЩИХ РАЗРЯДОВ, ВЫЗВАННЫХ ГРОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ НА ПОДЖИГ ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЕЙ

Одной из нерешённых проблем нефтегазовой отрасли являются пожары, вызванные вторичным воздействием атмосферного электричества. Под действием электрического поля молнии с конструктивных элементов резервуара с малым радиусом кривизны могут возникать восходящие разряды [1], энергия которых может оказаться достаточной для поджига выделяющегося взрывоопасного газа. Наиболее опасным случаем является возникновение восходящего разряда с дыхательного клапана.

Карло Мазетти проводились эксперименты по измерению энергии стримерных разрядов, вызвавших поджиг бензино-воздушной смеси [2]. Значения энергии этих разрядов лежат в диапазоне 4–44 мДж, что на порядок выше нормативных значений. Различие обусловлено тем, что процесс поджига является вероятностным и зависит не только от энергии стримера, но и от условий его возникновения.

Для возможности расчёта вероятности возникновения восходящих разрядов на кафедре ТЭВН разработана вероятностная методика [3]. Данная методика расширяет критерий возникновения лидерного разряда М. Курея. Согласно [3] при учёте возможности возникновения стримерных разрядов, вероятность воспламенения взрывоопасного газа возрастает более, чем на 30%. На данный момент выполнены расчёты, подтверждающие возможность возникновения восходящих разрядов в электрическом поле нисходящего лидера молнии и грозового облака.

В дальнейшей работе запланирована экспериментальная проверка результатов, полученных расчётным путём с помощью экспериментально-измерительного комплекса, моделирующего разряд молнии.

Литература

1. Дегтярев Д.В., Печеркин А.С. Требования промышленной безопасности в области молниезащиты резервуарных парков нефти и нефтепродуктов // Безопасность труда в промышленности. № 2. 2010. С. 28–31.
2. Mazzetti C., Flisowski Z., Stanczak B., Investigation of upward discharge parameters in correlation with ignition of explosive mixtures at impuls voltages. — Proc. of the 21st ICLP, Germany, 1992, pp. 463–468.
3. Гундарева С.В., Калугина И.Е., Темников А.Г. Расчёт возникновения опасных незавершённых разрядов с взрывоопасных объектов во время грозы // Электричество. № 10. 2016. С. 17–24.

П.К. Цепалин, студ.; рук. О.С. Белова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ МОЛНИЕЗАЩИТЫ НОСОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Носовой обтекатель, защищающий расположенное под ним чувствительное электронное оборудование летательного аппарата, из-за своего расположения является одним из наиболее подверженных разряду молнии элементов. Основная цель проектирования его молниезащиты — это обеспечение высокой надежности без снижения радиопрозрачности обтекателя. В настоящее время в основном применяются два основных типа молниеотводов, каждый из которых имеет свои особенности: полосовые и сегментные, состоящие из отдельных токопроводящих элементов. Полосовые молниеотводы эффективно отводят ток благодаря своей непрерывной проводящей поверхности, но могут существенно влиять на диаграмму направленности антенны [1]. С другой стороны, сегментные молниеотводы меньше влияют на характеристики антенны, но их эффективность напрямую зависит от геометрических параметров используемых сегментов [1]. Также исследования, проведенные в работе [2], показывают, что сегментные молниеотводы могут служить источником высокочастотных электромагнитных помех из-за искровых разрядов между отдельными сегментами молниеотвода при воздействии импульсных напряжений. Для минимизации этого эффекта авторы советуют тщательно подбирать геометрические параметры сегментных полос, такие как расстояние между сегментами, их размеры и форму [2].

В рамках представленной работы с помощью генератора импульсных напряжений выполнено исследование эффективности различных типов молниеотводов. Исследовались различные конфигурации полосовых и сегментных молниеотводов для различного положения антенны при обеих полярностях напряжения. В результате было получено, что эффективность молниеотводов зависит от угла наклона антенны. При отрицательной полярности и горизонтальном положении антенны средний ток разряда снижается с уменьшением длины полосовых молниеотводов для одинакового их количества.

Литература

1. **Karch, C.; Heidler, F.; Paul, C.** Protection of Aircraft Radomes against Direct Lightning Strikes — An Overview. *Atmosphere* 2021, 12, 1141.
2. **Temnikov, A.; Chernensky, L.; Belova, O.; et al.** Influence of kind of lightning stripe models on spectral characteristics of discharge phenomena inside aircraft nose radome model // *Journal of Electrostatics*. — 2022.

В.Е. Ашаев, асп.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛА ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ РАБОТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6–35 кВ

Тема является актуальной и востребованной из-за возрастания требований к релейной защите в воздушных и кабельных сетях 6–35 кВ от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Активное развитие электросетевой инфраструктуры в городах, сельских населенных пунктах и на предприятиях ведет к ужесточению требований по электробезопасности и работе сетей в режиме ОЗЗ.

В связи с этим требуется разработать технические решения для перехода на современные методы фиксации ОЗЗ, обеспечивающие ускоренную локализацию поврежденного фидера и при необходимости, селективное отключение только поврежденного присоединения при ОЗЗ. Данные требования возможно реализовать на микропроцессорных терминалах релейной защиты с помощью цифрового алгоритма корреляционной защиты.

В данной работе рассматривается структура и алгоритм построения комплекса селективной релейной защиты при ОЗЗ на базе корреляционной защиты с использованием коммутации маломощного резистора, формирующего наложенный импульсный ток. Рассматривается двойное кратковременное замыкание неповрежденной фазы на землю при различных моментах включения неповрежденной фазы на землю, а также включения различных неповрежденных фаз на землю.

Главная цель работы — экспериментальная валидация алгоритма корреляционной защиты, нацеленного на обнаружение импульсных сигналов в распределительной сети. Ключевая задача — подтверждение способности алгоритма детектировать моделируемый сигнал, генерируемый коммутацией маломощного резистора, установленного в центре питания, и устойчиво работать как с сигналами полностью известной, так и с неизвестной начальной фазой.

Литература

1. Арцишевский Я.Л., Балашов В.В. Релейная защита и электробезопасность персонала энергокомпаний и населения // Энергоэксперт. 2020. № 4 С. 64–67.
2. Арцишевский Я.Л., Баяр Б.Э., Балашов В.В. Ступенчатая корреляционная защита при ОЗЗ с коммутацией маломощного резистора в сети 6–35 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2020 № 3. С. 26–29.

Д.А. Кругликов, асп.;
рук. Д.И. Ковалев, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С КОМПОЗИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рост требований к надёжности, ресурсу и характеристикам высоковольтного оборудования приводит к необходимости оптимизации изоляционных систем на основе полимерных композитов, широко применяемых в высоковольтном оборудовании. Исследование влияния фракционного состава композитных материалов на совокупность характеристик изоляционного материала является актуальной задачей, направленной на снижение массы и габаритов при сохранении электрической и тепловой стойкости.

В рамках исследований был разработан алгоритм определения электрофизических и тепловых характеристик электротехнического оборудования в зависимости от фракционного состава полимерного материала, представленный на рис. 1.

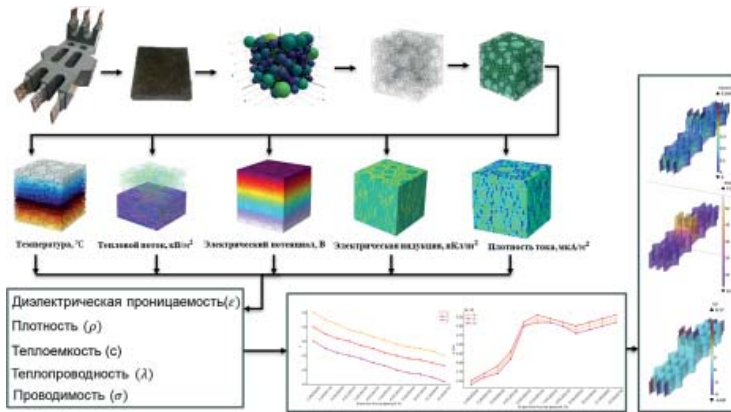


Рис. 1. Алгоритм определения электрофизических и тепловых характеристик электротехнического оборудования в зависимости от фракционного состава полимерного материала

Разработанный алгоритм формирует замкнутую проектную методологию, позволяющую количественно оценить влияние дисперсного состава на характеристики высоковольтных систем.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0017).

Литература

1. DeArmitt C., Rothon R. "Particulate fillers, selection, and use in polymer composites," Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series, ed. S. Palsule, Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-642-37179-0_1-2

*А.А. Пахмутова, студ.; И.С. Полыгалин, студ.;
Н.А. Сараев, студ.; Д.П. Яковлев, студ.;
рук. А.А. Волошин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2050 года [1] развитие электротранспорта и необходимой для его работы зарядной инфраструктуры является одной из мер по удовлетворению потребностей внутреннего рынка в продукции и услугах топливно-энергетического комплекса.

В целях обеспечения надежности и стабильности работы энергосистемы необходимо прогнозировать нагрузку на электрозарядных станциях, которая имеет вероятностный и стохастический характер [2].

Набор данных [3], на которых обучались модели, содержал исторические данные за период с 1 января 2020 года по 31 декабря 2020 года, собранные с 50 различных электрозарядных станций. В ходе предобработки для каждой станции были созданы почасовые записи о зарядных сессиях электромобилей, в каждой из которых были выделены лаговые и циклические признаки, а также признаки на основе скользящего среднего. Целевой переменной предсказаний модели стала мощность, потребляемая в данный час на конкретной электрозарядной станции.

В ходе исследования были рассмотрены такие методы как линейная регрессия, XGBRegressor, Random Forest, Gradient Boosting, Decision Tree и LSTM модель.

Согласно результатам исследования, наилучшие результаты показала LSTM-модель ($R^2=0,91$, $RMSE=0,5$, $MAE=0,36$). Также высокую точность продемонстрировал метод градиентного бустинга ($R^2=0,83$) и случайного леса ($R^2 = 0,80$). XGBoostRegression ($R^2=0,72$), дерево решений ($R^2=0,51$) и линейная регрессия ($R^2=0,30$) показали наихудшие результаты.

Литература

1. **Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 №908-р** «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050».
2. **Шамарова Н.А., Шушанов И.Н., Федосов Д.С., Суслов К.В., Батухин А.Г.** Оценка неопределенности электрических нагрузок, обусловленных зарядом электромобилей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3 С 147–161.
3. **Adhoot Patil.** Electric Vehicle Charging Behavior and User Input. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kaggle.com>.

*А.А. Пахмутова, студ.; И.С. Польшалин, студ.; Д.А. Романов, студ.;
Н.А. Сараев, студ.; Д.П. Яковлев, студ.;
рук. А.А. Волошин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

КЛАССИФИКАЦИЯ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Надежность и устойчивость работы электроэнергетической системы (ЭЭС) являются критически важными задачами для современной энергетики. Одним из ключевых вызовов при эксплуатации электроэнергетических систем является оперативное и точное распознавание типов повреждений, в частности, разделение внутренних коротких замыканий (КЗ), требующих немедленного отключения защищаемого элемента, и внешних КЗ. Современные требования к цифровой трансформации электроэнергетики, отраженные в стратегических документах [1], актуализируют внедрение интеллектуальных алгоритмов анализа данных.

В этой связи применение моделей машинного обучения (МО), способных выявлять сложные, нелинейные паттерны в сигналах токов и напряжений, представляется перспективным направлением для повышения селективности и быстродействия защит.

Для решения задачи классификации видов КЗ были исследованы модели глубокого обучения, ориентированные на обработку временных рядов данных ЭЭС. В качестве исходных данных использовались осциллограммы токов и напряжений, соответствующие трем классам: «Нормальный режим», «Внешнее КЗ» и «Внутреннее КЗ». Для обучения и валидации моделей был сформирован датасет, содержащий более 600 опытов.

Наилучший результат показала модель LSTM с точностью 99,92% и коэффициентом детерминации $R^2=0,9966$. Модели SimpleRNN и Bidirectional LSTM также продемонстрировали высокую точность (99,71% и 99,07% соответственно), в то время как GRU показала результат значительно ниже (95,31%).

Литература

1. **Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 №908-р** «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050».

Гу Синьюань, аспирант; рук. Н.Ю. Лысов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ГАЗА НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ БАРЬЕРНОГО ОЗОНАТОРА С НЕИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОВЫМ ЗАЗОРОМ

Озон (O_3) является одним из наиболее эффективных и экологически безопасных окислителей, востребованных в водоочистке, медицине и промышленности. Синтез озона преимущественно осуществляется в барьерном разряде, параметры которого существенно влияют на производительность и энергоэффективность озонатора. Поэтому изучение факторов, определяющих характеристики разряда, представляет практический интерес для оптимизации работы озонаторов [1].

С целью анализа влияния давления рабочего газа на электрические параметры барьерного разряда была создана компьютерная модель озонатора с распределенными параметрами с возможностью регулировать значения неоднородности газового зазора α . Наличие несимметричности в системе приводит к неравномерному горению разряда и, следовательно, снижению эффективности использования озонатора.

На рис. 1 показано изменение суммарной мощности P при росте давления для случаев $\alpha = 0$ (идеальный озонатор) и $\alpha = 0,5$ (оси электродов смещены на половину размера газового зазора). Рост мощности определяется увеличением амплитуды приложенного напряжения (наряду с ростом напряжения горения), которое происходит из-за «втягивания» системы в резонанс, рис. 2.

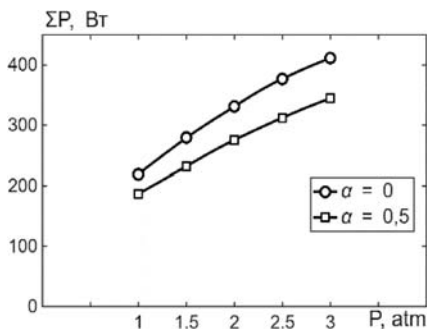


Рис. 1. Мощность в разряде при разных давлениях

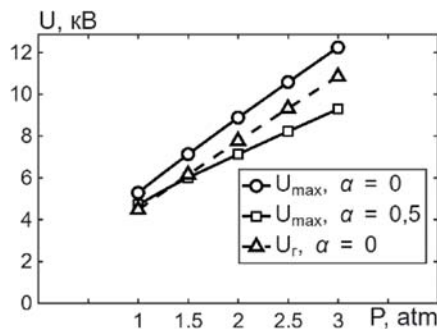


Рис. 2. Напряжения в озонаторе при разных давлениях

Таким образом, регулирование давления рабочего газа позволяет эффективно управлять электрическими параметрами разряда и достигать требуемой мощности даже в системах с неидеальным (неоднородным) газовым зазором.

Литература

1. В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов. М.: МАКС Пресс, 2008. — 216 с.

А.С. Текенов, студ.; рук. О.С. Белова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКООМНОГО ГРУНТА НА МОЛНИЕЗАЩИТУ ПОДЗЕМНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

В настоящее время основной объем информации передается по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), прокладываемых различными методами. При прокладке линий связи в грунте, для их защиты от механических нагрузок, используются специальные защитные покровы, выполненные в том числе из металла [1]. Трассы ВОЛС часто могут прокладываться вблизи высоких объектов (опоры ЛЭП, деревья и т.п.). При ударе молнии в такие объекты, вблизи линии связи, расположенной в грунте, будет растекаться ток молнии с заземляющего устройства. Возникшая разность потенциалов может привести к пробоем грунта и попаданию тока молнии в кабель [2].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния высокоомного грунта на молниезащищенность подземных линий связи. Разряд молнии моделировался с помощью генератора импульсных напряжений ГИН-1000 кВ. В ящик, наполненный хорошо просушенным песком, вставили проводящий стержень, выполнявший роль молниеприемника. Над этим стержнем располагался электрод, к которому подводилось напряжение от ГИН-1000 кВ. На глубине 10 см от поверхности грунта, возле стержневого электрода был закопан смотанный волоконно-оптический кабель. Также на одном уровне с кабелем в грунте была установлена металлическая заземленная антенна. В ходе проведения серии экспериментов, в одном из случаев удар пришелся в подземную заземленную антенну, минуя молниеотвод.

Т.е. в случае, когда у молниеотвода высокое сопротивление заземлителя, при разряде молнии, может быть поражен сам кабель, при наличии заземленного экрана. Требуются дополнительные исследования процессов, происходящих в высокоомном грунте. Помимо этого, необходимо учитывать возможность поражения молнией подземных ВОЛС при плохом заземлении молниеотвода или опоры ЛЭП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10223, <https://rscf.ru/project/23-79-10223/>

Литература

1. **Ефанов В.И.** Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС: Учебное пособие. — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. — 102 с.
2. **Соколов С.А.** Волоконно-оптические линии связи и их защита от внешних влияний: учебное пособие. — М.: Инфра-Инженерия, 2019. — 172 с.

*К.Р. Зантария, студ.; Д.А. Вертогузов, асп.;
рук. А.А. Лебедев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА 6–35 КВ С ПОМОЩЬЮ ЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Для трансформаторов 6–35 кВ мощностью менее 4 МВА в соответствии с [1] и ПУЭ в качестве основных защит должны применяться токовая отсечка (ТО) и максимальная токовая защита (МТЗ). В этом случае КЗ на выводах обмотки НН отключается МТЗ, выдержка которой может составлять несколько секунд. Для повышения быстродействия комплекса РЗА предлагается использовать логическую защиту трансформатора (ЛЗТ).

Принцип действия ЛЗТ основан на косвенном контроле токов на входе и выходе защищаемого трансформатора. ЛЗТ содержит измерительные органы тока (ИОТ) стороны ВН и НН. Для срабатывания защиты требуется выполнение двух условий: срабатывание ИОТ на стороне ВН и несрабатывание ИОТ на стороне НН.

Реализация ЛЗТ трансформаторов и автотрансформаторов на электрохимической базе описан в [2]. Также существуют решения по реализации ЛЗТ в микропроцессорных устройствах РЗА (МП УРЗА) [3]. В имеющихся решениях используется один тип сигналов — блокирующий или разрешающий (БС и РС).

Предлагается использование БС и РС совместно. Данное решение позволяет повысить быстродействие защиты за счет отказа от выдержек времени на ожидание сигнала в 50–150 мс. Для формирования РС необходимо использовать отдельные пусковые органы (ПО), выявляющие КЗ в сети. При срабатывании ПО и несрабатывании ИОТ НН может быть сделан вывод о внутреннем КЗ.

Применение ЛЗТ в составе МП УРЗА позволяет повысить быстродействие комплекса РЗА трансформатора 6–35 кВ, значительно снижая время протекания токов КЗ. Это оптимальное решение для трансформаторов малой мощности, для защиты которых не предполагается использование дифференциальной защиты.

Литература

1. **СТО 56947007-29.240.10.248-2017.** Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС).
2. **Маруда И.Ф.** Релейная защита двойной селективности. Логические защиты электрических объектов. Электричество. 2011. № 1.
3. **Логика работы РЗА TEC_RecDoc_RPA_2.** Версия 6.0. ООО «Таврида Электрик».

М.Е. Мартынов, асп.; рук. В.Ф. Лачугин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ

Современные распределительные электрические сети 6–10 кВ характеризуются возрастающей сложностью конфигурации, ростом нагрузок и активным внедрением распределенных источников энергии, что предъявляет повышенные требования к эффективности функционирования релейной защиты (РЗ). Особую значимость эти вопросы приобретают в условиях разнородности городских и сельских сетей [1, 2].

В качестве перспективного решения предлагается методология автоматического синтеза алгоритмов РЗ. Её основу составляет онтологический подход, формализующий знания о типах повреждений, оборудовании и требованиях к защите [3, 4]. Процесс синтеза включает анализ топологии сети, расчет режимов короткого замыкания и генерацию логики срабатывания с использованием искусственного интеллекта (продукционных систем с базой правил).

Для практической реализации предлагается программный комплекс, интегрируемый с системами проектирования. Верификация синтезированных алгоритмов проводится путем математического моделирования в средах типа MATLAB/Simulink и ПАК ЦДЭС.

Данная методология позволяет преодолеть ключевые limitations традиционной РЗ, значительно сократить время проектирования и повысить адаптивность, надежность и селективность защиты. Дальнейшее развитие связано с интеграцией машинного обучения для оптимизации алгоритмов на основе данных о реальных срабатываниях и созданием цифровых двойников.

Литература

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. — СПб.: Политехника, 2007.
3. **Шнесрсон Э.М.** Цифровая релейная защита. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
4. **Лачугин В.Ф.** Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, А.Л. Куликов [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2015. — № 4. — С. 28–37.

*Р.С. Максимов, ст. преп.; И.С. Полыгагин, студ.;
Д.А. Романов, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИИ ИНЖЕКЦИИ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ

Рост числа подключаемых возобновляемых источников энергии (ВИЭ), использующих силовую электронику на уровнях передачи и распределения, приводит к возникновению новых задач для традиционных систем релейной защиты и автоматики (РЗА). Это обуславливает необходимость тщательного изучения воздействия подобных устройств на функционирующие на данный момент защитные комплексы. Исторически системы релейной защиты проектировались для электроэнергетических сетей, в которых основными источниками токов короткого замыкания (КЗ) выступают синхронные генераторы (СГ), чьи режимы при аварийных процессах хорошо исследованы и предсказуемы. Однако поведение ВИЭ, подключённых через силовые преобразователи, резко отличается от работы синхронных установок, что может вызывать сложности при реализации некоторых функций РЗА, включая своевременное выявление повреждений.

Многие международные сетевые кодексы предусматривают требования к функции инъекции реактивного тока, пропорциональной снижению напряжения на выходе преобразователя. В связи с этим актуальной является разработка алгоритма управления, позволяющего определять оптимальные параметры инъекции тока обратной последовательности (ОП) таким образом, чтобы сопротивление ОП оставалось постоянным независимо от типа и места КЗ.

Разработанная методология базируется на применении инъекции токов ОП в системе управления силовым преобразователем. Алгоритм формирует ток ОП, пропорциональный измеренному напряжению, обеспечивая имитацию характеристик синхронного генератора. Результаты показывают, что алгоритм оказывает значительное влияние на поведение инверторной установки, повышая предсказуемость её работы и предотвращая ложные срабатывания РЗА. Реализованная система поддерживает постоянное сопротивление ОП, позволяя гибко управлять поведением ВИЭ: подавлять или подавать требуемое значение тока ОП для корректного функционирования РЗА.

Литература

1. **C. Bao, X. Ruan, X. Wang, W. Li, D. Pan and K. Weng**, 'Step by-Step Controller Design for LCL-Type Grid-Connected Inverter with Capacitor-Current-Feedback Active-Damping', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, N°3, pp. 1239–1253, 2014.

*А.Э. Сергеева, студ.; А.С. Зененко, асп.;
рук. В.С. Ларин, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Повышение надежности энергосистем требует развития современных методов диагностики силовых трансформаторов. В последние годы широкое применение получил метод частотных характеристик (МЧХ), который является мощным инструментом для оценки технического состояния силовых трансформаторов. Результатами измерений являются частотные характеристики, которые также несут в себе информацию о стандартных диагностических параметрах (сопротивление короткого замыкания, коэффициент трансформации и др.), которые могут быть использованы для экспресс-оценки состояния силовых трансформаторов. В докладе рассмотрены схемы измерений МЧХ и способы получения из частотных характеристик стандартных диагностических параметров (таблица 1).

Таблица 1

Контрольный параметр	Виды повреждений	Схема измерений МЧХ
$\operatorname{tg}\delta$	Возникновение дефектов в изоляции	
$R_{\text{из}}$		
C	Изменение строения трансформатора (обрыв заземления, изменение геометрии активной части); Ухудшение состояния изоляции (увлажнение, деградация целлюлозной изоляции)	Ёмкостная схема с модификациями
СОПТ	Ослабление контактов из-за перегрева и эрозии; Обрыв цепи, межвитковое замыкание	Сквозная схема
$Z_K (L_K, R_K)$	Изменение геометрии обмоток, уменьшение силы прессовки; Витковые замыкания	Сквозная с закороченной вторичной обмоткой
K_T	Повреждения переключающего устройства; Витковые замыкания	Сквозная с закороченной вторичной обмоткой; Индуктивная схема
$P_{\text{хх}} (I_{\text{хх}})$	Витковые и катушечные замыкания; Уменьшение силы прессовки и износ межлистовой изоляции	Сквозная схема с модификациями

А.А. Гранская, асп.;
рук. Р.Г. Минуллин, д.ф.-м.н., проф.;
В.А. Касимов, д.т.н., доц. (КГЭУ, Казань)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В PSCAD

Локационный метод основан на подаче импульсного сигнала в линию и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлениях после отражения от конца линии, ВЧ заградителя или любой другой неоднородности [1].

Для исследования влияния включения и отключения ЛЭП, обрывов фазных проводов, коротких замыканий на отраженные сигналы локационного зондирования в программной среде PSCAD была разработана имитационная модель высокочастотного (ВЧ) тракта действующей ЛЭП 110 кВ, соединяющей подстанции «Кутлу Букаш — Рыбная Слобода — Камская». Основные компоненты, использованные при моделировании: линия электропередачи, ВЧ заградители, конденсаторы связи, фильтры присоединения, локатор, заземляющие ножи, выключатели.

Анализ полученных результатов показал:

- времена прихода отраженных сигналов соответствуют длине моделируемой линии и экспериментальным данным;
- для отключенных состояний ЛЭП амплитуда отраженного сигнала увеличивается относительно включенного состояния, максимальная амплитуда сигнала наблюдается при замыкании заземляющего ножа (ЗН);
- замыкание выключателя приводит к появлению колебательного процесса «звона» с частотой приблизительно 120 кГц в окончании отраженного сигнала, а при замыкании ЗН появляется более мощный «звон» и на более низких частотах — примерно на 60 кГц;
- при обрыве фазного провода появляется отраженный сигнал от места повреждения с положительной полярностью, что говорит об увеличении волнового сопротивления в месте обрыва фазного провода. При этом амплитуда отраженного сигнала от ПС «Рыбная Слобода» уменьшается.

В результате выполненных работ было установлено, что изменение состояния ЛЭП приводит к искажению отраженного локационного сигнала. Появляется возможность использования модели в составе локационного комплекса для автоматического определения состояния ЛЭП и коррекции эталонной рефлектограммы.

Литература

1. **Минуллин Р.Г.** Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2022. 440 с.

А.В. Калашникова, студ.;
рук. И.Е. Иванов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Использование синхронизированных векторных измерений (СВИ) для решения задач электроэнергетики имеет большой потенциал. Данная работа посвящена применению данных СВИ для оценки класса точности измерительных трансформаторов напряжения (ТН).

Целью работы является разработка и автоматизация методики контроля класса точности ТН на основе данных, полученных от устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ). В рамках работы выполнен анализ результатов от нескольких УСВИ, установленных на отходящих присоединениях станций и подстанций Единой энергосистемы.

На первом этапе в среде «MATLAB» был разработан алгоритм автоматизированной обработки данных. Были проанализированы архивы СВИ с Калининской атомной электростанции (АЭС) и двух подстанций 500 кВ «Озёрная» и «Итатская». Для каждого энергообъекта построены графики полных векторных отклонений отдельно по каждой фазе.

На рисунке 1 представлен разброс погрешностей ТН пяти присоединений фазы А подстанции «Озёрная», где все ТН вписываются в очерченную границу допустимой погрешности. Рисунок 2 демонстрирует аномалию угла напряжения для присоединения «Опытная» Калининской АЭС. Для формирования выводов в докладе также будут проанализированы еще несколько архивов данных по АЭС за различные периоды времени.

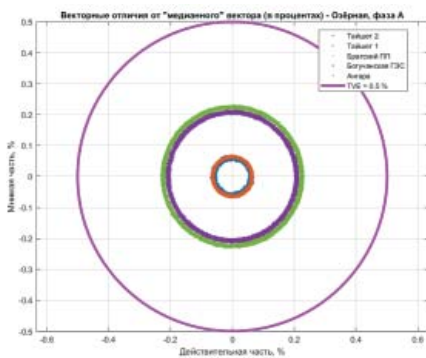


Рис. 1. Векторный разброс измерений на подстанции «Озёрная»

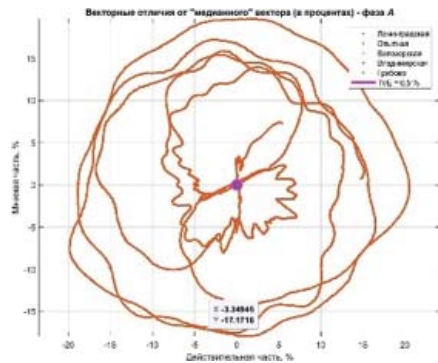


Рис. 2. Векторный разброс измерений на Калининской АЭС

Д.Э. Вераксо, асп.;
рук. Л.А. Дарьян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ», Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ВОДЫ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Увеличение содержания влаги во внутренней изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования (ВМО) приводит к ухудшению диэлектрических свойств трансформаторного масла (ТМ). В связи с этим определение концентрации воды в ТМ является важнейшим элементом контроля состояния внутренней изоляции ВМО.

Одним из перспективных методов определения влагосодержания ТМ является диэлькометрический, реализуемый в датчиках относительной влажности. Для расчета абсолютного влагосодержания, которое является регламентированным параметром контроля качества ТМ, необходимы данные о растворимости воды в ТМ. Растворимость воды в ТМ зависит от химической природы и степени старения, а также температуры трансформаторного масла.

Целью данной работы являлось определение растворимости воды в ТМ отечественного производства.

В работе [1] приведены сведения о растворимости воды в трансформаторных маслах зарубежного производства и методиках ее определения. В основу методик положено уравнение Аррениуса. Приведенные методики отличались способами насыщения влагой ТМ и режимом его нагрева. Нами предложена методика насыщения ТМ влагой, позволяющая оптимизировать этот процесс и не применять дорогостоящее оборудование и реактивы. При этом в предложенной методике предусмотрено применение отечественных измерительных приборов, в частности, диэлькометрического датчика влажности.

Для ТМ отечественных изготовителей получены коэффициенты растворимости воды и построены её зависимости от температуры.

Предложенная методика может быть рекомендована для внедрения предприятиями и организациями, изготавливающими и эксплуатирующими трансформаторные масла.

Литература

1. **Atanasova-Höhlein I. et al.** Experience with capacitive on-line sensors for moisture evaluation in transformer insulation // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2019. — Vol. 35. — № 2. — P. 18–26.

С.Н. Девяткин, асп.; рук. Л.А. Дарьян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ТРУБКИ ДЛЯ ОТБОРА ГАЗА ИЗ ГАЗОВОГО РЕЛЕ ПРИ ПОМОЩИ ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Наличие газа в газовом реле силового трансформатора может свидетельствовать о начале развития повреждений внутренней изоляции силового трансформатора. Для принятия решения о выводе силового трансформатора из работы, после срабатывания газовой защиты, необходимо оперативно провести проверку газа, отобранного из газового реле, на горючесть в полевых условиях, для чего применяют переносные газоанализаторы, например, ПИГГ или ELCHROMDET. В случае обнаружения горючих газов необходимо произвести их отбор и доставку в лабораторию для проведения хроматографического анализа [1]. Для этих целей используются специально разработанные газоплотные пробоотборники газа. Определение горючести газов проводится следующим образом. Газоанализатор присоединяется к газоотборному крану с одной стороны и газоплотному пробоотборнику — с другой. При такой схеме присоединения газоанализатора к газовому реле через трубку, в некоторых случаях возникает необходимость в уменьшении воздействия нагретого газа на измерительные элементы прибора, чтобы предотвратить последующее нарушение работы газоанализатора.

Целью работы является оптимизация выбора материалов и геометрии соединительной трубки на основе моделирования процесса теплоотвода.

Уменьшить воздействие горячего газа на измерительные элементы газоанализатора можно увеличив длину соединительной трубки. Но в этом случае увеличивается «мертвый» объем и снижаются концентрации анализируемых газов, т.е. нарушается представительность пробы. Одним из путей решения этой проблемы является подбор материала для соединительной трубки с оптимальным коэффициентом теплопроводности.

Проведён численный анализ процесса теплообмена между нагретой газовой смесью и стенками трубки при различных скоростях потока газа. При этом принято, что течение газа является ламинарным, а при переносе тепла учитывалась конвективная и кондуктивная составляющие. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показали хорошую сходимость.

Литература

1. РД 153-34.0-35.518-2001 Инструкция по эксплуатации газовой защиты (Утв. Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 27.04.2001 г.).

А.В. Иванов, студ.; рук. Л.Л. Черненский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЁТА МОЛНИЕЗАЩИТЫ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Использование компьютерного расчёта позволяет проектировать системы молниезащиты для объектов сложной геометрической конфигурации [1].

Рассматриваются примеры решения задач молниезащиты в разработанном программном продукте с использованием моделирования наземных объектов и системы молниеотводов. Программный комплекс проводит расчёт и визуализацию зоны молниезащиты многократного молниеотвода в соответствии с нормативными документами, действующими в Российской Федерации [2, 3].

Разработанный специализированный программный комплекс ориентирован на проектирование систем не только сосредоточенных объектов, но и протяжённых, где ключевым требованием является применение тросовых молниеотводов. Программа обладает библиотекой типовых объектов, а также предоставляет инструменты для создания и хранения пользовательских объектов. Программный комплекс позволяет сохранять задачи, состоящие из совокупности наземных объектов любой геометрической сложности и системы молниеотводов.

Для детального анализа полученного решения (зоны защиты молниеотводов) реализована функция для построения на заданной высоте среза, визуализирующего границы расположения конструкций и зон защиты на этой высоте (двухмерное решение). В результате, программный комплекс представляет графическое решение задачи в двухмерном (с указанием геометрических размеров зон защиты) и трёхмерном виде.

Таким образом, новый разработанный программный комплекс позволяет решать инженерные задачи в области молниезащиты наземных объектов.

Литература

1. **В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь** Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Учебное пособие для вузов. Под общей редакцией В.П. Ларионова — Москва, Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.: ил.
2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений: РД 34.21.122-87: утв. Главтехуправлением Минэнерго СССР 12 октября 1987. — 32 с.
3. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: СО 153-34.21.122-2003: утв. Приказом Министерства энергетики России от 30 июня 2003 г. N280 : ввод. в действие с 30 июня 2003 года. — 59 с.

Секция 60
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
Theoretical basis of electrical engineering

Председатель секции: к.т.н. Силаев Максим Андреевич

Секретарь секции: к.т.н., доцент Жохова Марина Павловна

*М.Ю. Козеной, О.А. Пунников, студ.;
рук. М.П. Жохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В СИСТЕМЕ SimInTech

Программная платформа Simintech, предназначенная для разработки моделей динамических процессов, может быть использована для формирования и дальнейшего решения матричных уравнений линейной электрической цепи. Представление схемы электрической цепи в виде графа, ввод информации о топологии и параметров элементов в виде таблиц (Т-списков) позволяет по известным алгоритмам сформировать топологические матрицы: **A** (матрицу соединений), **B** (матрицу главных контуров) и **D** (матрицу сечений) [1]. С использованием топологических матриц формируются узловые уравнения в матричной форме и уравнения состояния (УС). Узловые уравнения в матричной форме составляют основу для анализа установившихся режимов линейных электрических цепей постоянного и синусоидального тока и диагностики электрических цепей. Уравнения состояния широко используются для анализа динамических режимов в электрических цепях [2].

В докладе представлены алгоритмы формирования топологических матриц в каноническом виде, с разделением на подматрицы ветвей дерева и ветвей связи (хорд). Проверка правильности формирования топологических матриц — выполнение основного свойства топологических матриц:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^T = \mathbf{0}, \quad \mathbf{D} \cdot \mathbf{B}^T = \mathbf{0} \quad (1)$$

Приведены примеры формирования узловых уравнений методом поэлементного вклада и с использованием матрицы соединений, решения узловых уравнений в матричной форме и методом простых итераций. Реализован алгоритм выбора ветвей дерева и формирования УС в каноническом виде с использованием матричных уравнений. Использование рассмотренных методик подходит для образовательных целей, а также автоматизации анализа и моделирования электрических схем.

Литература

1. **Чуа Л.О., Лин П.-М.** Машинный анализ электронных схем / Пер. с англ. — М.: Энергия, 1980. — 640 с.
2. **Демирчян К.С., Бутырин П.А.** Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учебн. пособие для электр. и электроэнегр. спец. вузов — М.: Высш. шк., 1988. — 335 с.

А.С. Локтионов, студ.;
рук-ли: М.П. Жохова, к.т.н., доц.,
М.А. Козина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Токи коротких замыканий, возникающие в результате аварий, могут достигать больших значений и вызывать сильный перегрев генераторов, трансформаторов, проводов, двигателей и т.д. Для правильного выбора и настройки защитной аппаратуры необходимо уметь вычислять токи короткого замыкания. В зависимости от целевого назначения используют различные методики расчета токов короткого замыкания, максимально возможный ток короткого замыкания, который называется ударным током короткого замыкания ($i_{уд}$), рассчитывают по оценочным формулам [1]. Так как короткое замыкание в цепи является коммутацией, то расчет токов короткого замыкания — расчет переходного процесса, как правило с наличием апериодической составляющей. В курсе ТОЭ не рассматриваются задачи расчета переходных процессов в трехфазных цепях [2]. Однако при симметричном трехфазном коротком замыкании можно рассмотреть переходной процесс в одной фазе, в остальных фазах расчет будет аналогичен с учетом фазных сдвигов действующих ЭДС. Проведенный аналитический расчет классическим методом подтверждает, что примерно через 0,01 секунду (при частоте 50 Гц) с момента короткого замыкания появляется ударный мгновенный ток, значение ударного тока зависит от соотношений параметров элементов цепи, начальной фазы тока предшествующего режима. Погрешность определения ударного тока при использовании формул, используемых для оценки ударного тока, по сравнению с аналитическим решением составила менее 0,5%. Было показано, что максимально возможный ток короткого замыкания наступает в случае, если в момент короткого замыкания напряжение расчётной фазы проходит через нулевое значение.

Литература

1. **М.А. Козина.** Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: учебное пособие — М.: Издательство МЭИ, 2019. — 144 с.
2. **М.П. Жохова, Д.В. Михеев.** Теоретические основы электротехники: В 3 ч. Ч. 2. Трехфазные линейные цепи. Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами. Нелинейные цепи — М.: Издательство МЭИ, 2025. — 268 с. ISBN 978-5-7046-3147-7

*О.А. Ниарко, асп.; П.А. Бордадын, асп.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ОЦЕНКА ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ТЕМА (ГАНА)

Стабильное напряжение и сбалансированная реактивная мощность — важные условия надёжной работы современных распределительных сетей. Однако устаревшая инфраструктура и протяженные радиальные фидеры приводят к высоким техническим потерям и отклонениям напряжения во многих развивающихся энергосистемах. В данном исследовании представлен анализ, выполненный с помощью компьютерного моделирования с использованием параметров сети, характерных для города Тема (Гана). Анализ был сфокусирован на двух различных типах нагрузки: фидер «Джерико» (бытовые потребители) и фидер «Ферро Фабрик» (промышленные потребители).

В программном комплексе ETAP была разработана математическая модель сети и выполнен расчет установившихся режимов. Расчет выполнялся методом Ньютона-Рафсона. Для оценки потенциальных проблем с напряжением и коэффициентом мощности расчет выполнялся в режиме наибольших нагрузок.

По результатам моделирования было выявлено, что падение напряжения на фидере, питающем бытовую нагрузку, составляет 5,63%, что превышает допустимый предел в 5%. Кроме того, коэффициент мощности на фидере, питающем промышленную нагрузку, составляет 87,3% (индуктивный). Это говорит о значительной доле нескомпенсированной реактивной мощности, которая приводит к дополнительным потерям.

Разработанная модель эффективна для оценки падения напряжения и реактивной мощности в сетях. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что на фидере, питающем бытовую нагрузку, необходимо произвести замену проводов, а также осуществлять регулирование напряжения. На фидере, питающем промышленную нагрузку, целесообразна установка батарей статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности. Проведенный анализ доказывает, что данные меры позволяют улучшить эффективность передачи электроэнергии в подобных системах.

Литература

1. **Кундур П.**, «Стабильность и Контроль Энергосистемы.» “Макгроу-Хилл,” Нью-Йорк, р. 978, 1994. doi: ISBN 0-07-035958-X.

Ю.Н. Кузнецова, асп.;
рук. О.М. Большунова, к.т.н., доц. (Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ФОРМЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Одним из критериев качества электроэнергии является синусоидальность напряжения [1]. Стандартным методом анализа периодических несинусоидальных напряжений и токов является метод гармонического анализа [2], имеющиеся недостатки вынуждают искать новые методы для анализа, к примеру, метод сплайн-интерполяции.

Сплайн-интерполяция применяется для аналитического описания некоего набора данных на заданном отрезке, при этом становится возможным дальнейший анализ полученной функциональной зависимости, описанной при помощи ряда полиномов [3].

В рамках данной работы проводится сравнительный анализ двух методов — метода гармонического анализа и метода сплайн-интерполяции. Моделируются наборы периодических несинусоидальных напряжений и токов разной степени несинусоидальности с помощью ПО «Multisim». Полученные наборы сигналов аналитически описываются с применением разных методов.

Восстановленные по аналитическим описаниям сигналы сравниваются с исходными сигналами, полученными при моделировании. Проводится интегральная оценка отклонения значений для сравнения точности разных методов.

Согласно полученным результатам, метод сплайн-интерполяции является более точным методом по сравнению с методом гармонического анализа. Сплайн-интерполяция является перспективным методом анализа.

Литература

1. **Костин В.Н., Сычев Ю.А., Сериков В.А.** Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения горно-обогатительного комбината с мощной нелинейной нагрузкой // Промышленная энергетика. — 2024. — № 5. — С. 50–57. DOI:10.34831/EP.2024.79.14.007
2. **Htita, I. et al.** Nonlinear Loads Modeling and Harmonics Analysis: A Review / I. Htita, O.H. Abdalla, M.I. El Korfolly, S. Elmasry // Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering). — 2024. — Vol. 17. — Nonlinear Loads Modelling and Harmonics Analysis. — № 5. — P. 429–443. DOI: 10.2174/2352096516666230821161502.
3. **Леонтьев В.Л.** Метод Фурье, связанный с ортогональными сплайнами, в параболической начально-краевой задаче для области с криволинейной границей // Уфимский математический журнал. — 2022. — Т. 14, № 2. — С. 58–69. EDN:NJRVAY

*М.С. Срыбник, студ.; К.В. Шиш, асп.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Для снижения несимметрии токов и напряжений в четырехпроводных трехфазных электрических цепях (электрических сетях номинальным напряжением 0,4 кВ) могут применяться несимметричные трехфазные участки цепи. Они представляют собой совокупность емкостных элементов (батареи статических конденсаторов) с различными емкостями, соединенных в «звезду» и «треугольник». В электроэнергетике такие участки цепи именуют симметрирующими устройствами (СУ) [1]. При этом выбор параметров СУ может быть осуществлен по результатам измерений.

В связи с этим целью исследования является определение параметров симметрирующего устройства, устанавливаемого в трехфазной четырехпроводной цепи, на основании результатов измерений.

В работе предложена методика выбора параметров СУ (рис. 1) для снижения несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Произведен выбор параметров симметрирующего устройства при наличии единственного несимметричного потребителя. Решена оптимизационная задача по определению параметров и места установки СУ в четырехпроводной трехфазной цепи. Критерий оптимума состоял в минимуме мощности СУ и непревышении коэффициентов несимметрии по ОП в точках цепи значения $K_{2U} = 2\%$ [2].

Полученные в работе результаты могут быть применены для решения вопросов обеспечения качества электроэнергии в низковольтных четырехпроводных электрических сетях.

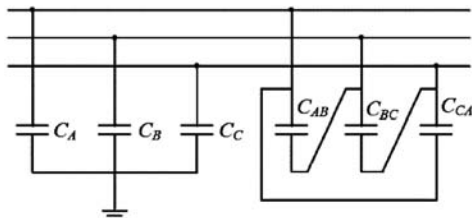


Рис. 1. Схема СУ

Литература

1. И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, Р.Р. Насыров. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

*А.Ю. Дючков, А.А. Константинова,
М.И. Тузлукова, В.В. Финаева, студ.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. («НИУ «МЭИ»)*

ПРЕПОДАВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) является фундаментальной для ряда инженерных специальностей, так как формирует теоретическую базу для изучения большинства предметов электроэнергетической специальности. В связи с этим необходимо периодически модернизировать учебную программу, основываясь на лучших мировых практиках. Для этой цели был проведен обзор и анализ более 50 отечественных и зарубежных литературных источников с целью выявления исторических предпосылок создания электротехнических школ, особенностей преподавания ТОЭ в разных странах и существующих подходов по повышению эффективности изучения дисциплины.

Формирование школы электротехники началось в XVII–XVIII веках в Европе и развивалось параллельно в России и других странах.

Анализ школьных программ показывает, что базовые знания для начала изучения ТОЭ формируются разными способами: в России — через последовательное освоение разделов физики в 8–11 классах, в странах Восточной Азии — посредством углублённого изучения электромагнетизма с элементами анализа цепей, в Европе и США — как правило, в рамках факультативных программ.

ТОЭ как отдельная дисциплина в России преподаётся в нескольких крупных вузах. Программы схожи между собой, но отличаются наличием определенных разделов. Отечественная школа отводит центральную роль системному изложению теории. Визуализация в учебниках ограничивается схемами и графиками, а вопросы, связанные с применением современного программного обеспечения (ПО), редко рассматриваются подробно.

Для западных учебных пособий характерен акцент на визуализацию учебного материала, в том числе, использование фотографий, демонстрирующих связь теории и практики. В свою очередь в учебниках восточных стран доминирует проектно-ориентированный подход. Общей тенденцией для зарубежной образовательной литературы является применение специализированного ПО для компьютерного моделирования и расчета электрических цепей.

На основании результатов проделанной работы предложен перечень дополнений к учебной программе по ТОЭ, объединяющий лучшие идеи отечественной и зарубежной школ электротехники и позволяющий повысить эффективность изучения дисциплины.

*А.Д. Ионов, И.С. Карнаухов, студенты;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

В электроэнергетических вузах наблюдается рост роли дистанционного обучения и информационных технологий в образовательном процессе. Это определяет необходимость разработки новых форм организации лабораторных практикумов по инженерным дисциплинам, в частности, теоретической электротехнике. В этих условиях особенно актуальной является разработка виртуальных учебных стендов, позволяющих студентам отрабатывать практические навыки исследования электрических цепей в удалённом режиме.

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного лабораторного стенда на языке C для проведения дистанционных лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники» без применения готовых пакетов математического моделирования.

Разработка полного стенда, охватывающего весь курс лабораторных работ, представляет собой сложную инженерную задачу. В связи с этим в качестве начального этапа предлагается реализовать часть стенда, ориентированную на выполнение лабораторной работы «Параметры и характеристики элементов линейной цепи постоянного тока» [1].

В рамках первого этапа был разработан программный модуль для исследования линейной цепи постоянного тока с резистивными элементами и идеальными источниками. Модуль реализует алгоритмы расчёта токов, напряжений и эквивалентных сопротивлений на основе законов Ома и Кирхгофа. Разрабатывается простой графический интерфейс, через который студент сможет формировать схему, задавать параметры элементов, проводить измерения и фиксировать результаты в отчётной форме.

Этот фрагмент станет основой для расширения стенда с целью охвата всего курса лабораторных работ, формируя универсальную платформу, соответствующую требованиям цифровизации образования.

Литература

1. **Алексейчик Л.В.** Цепи постоянного и синусоидального тока: лабораторный практикум по курсу «Теоретические основы электротехники» // Нац. исслед. ун-т «МЭИ». — М.: Изд-во МЭИ, 2017. — 128 с.

М.Г. Анурьев, студ., К.В. Шиш, асп.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ

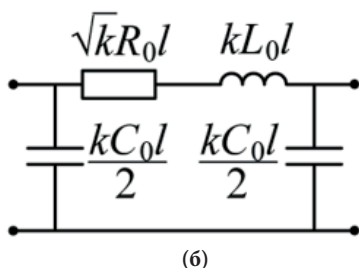
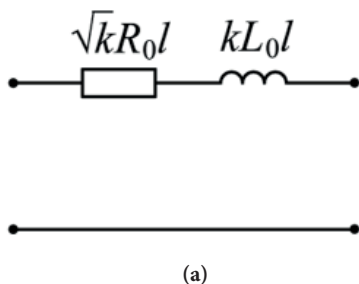


Рис. 1. Схемы замещения ВЛ:
(a) упрощенная, (б) П-образная

Для воздушных линий (ВЛ) электропередачи используются различные схемы замещения (рис. 1). На промышленной частоте для ВЛ номинального напряжения $U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ используется, как правило, упрощенная схема [1], представленная на рис. 1, а. При этом на частотах высших гармоник (ВГ) существенную роль начинает играть погонная емкость.

В связи с этим целью данной работы стал выбор оптимальной схемы замещения ВЛ номинального напряжения $U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ на частотах ВГ. Для ее достижения в работе были поставлены следующие задачи:

- 1) расчет А-параметров ВЛ на частотах ВГ при применении упрощенной схемы замещения (рис. 1, а);
- 2) расчет А-параметров ВЛ на частотах ВГ при применении П-образной схемы замещения (рис. 1, б);
- 3) сопоставление результатов расчета режима на частотах ВГ при различных схемах замещения ВЛ.

Результаты работы могут быть применены при расчете несинусоидальных режимов электрических сетей и разработке мероприятий по обеспечению качества электроэнергии [2]

Литература

1. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.: ил.
2. **Карташев И.И., В.Н. Тульский, Шамонов Р.Г.** и др.; под ред. Ю.В. Шарова. Управление качеством электроэнергии. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

*А.О. Лаврова, студ., К.В. Шиш, асп.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ

На практике исходные данные для моделирования, к примеру, кабельных линий (КЛ), часто являются ограниченными. При решении практических задач, как правило, в качестве известных величин выступают только погонные активные сопротивления, а погонные индуктивности и емкости зачастую неизвестны. При этом на частотах высших гармоник (ВГ) существенное влияние на расчет может оказывать погонная емкость КЛ. Тогда использование упрощенной схемы замещения (рис. 1,а) становится недопустимым.

В связи с этим актуальным вопросом является определение границ применимости различных схем замещения КЛ номинальным напряжением $U_{\text{ном}} \leq 35 \text{ кВ}$ [1] при расчете несинусоидальных режимов, что стало целью настоящей работы.

Для достижения данной цели в рамках работы были определены А-параметры КЛ, представленной в виде четырехполюсников различной топологии (рис. 1), и осуществлено сопоставление результатов расчета режима на частотах ВГ.

Результаты работы могут быть применены при расчете режимов электрических сетей на частотах высших гармоник и разработке мероприятий по обеспечению качества электроэнергии [2].

Литература

1. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.: ил.
2. **И.И. Каргашев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, Р.Р. Насыров.** Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.

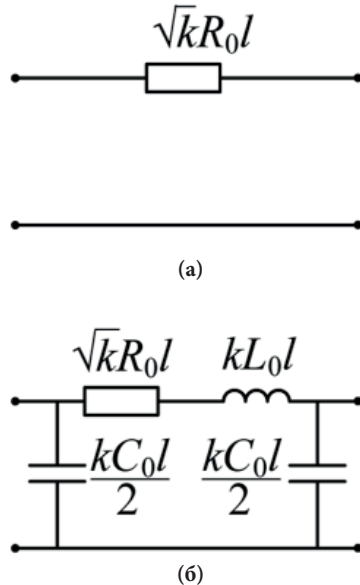


Рис. 1. Схемы замещения КЛ:
(а) упрощенная; (б) П-образная

*Т.В. Криворотько, студ.; П.А. Бордадын, асп.; К.В. Шиш, асп.;
рук. М.А. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА КОМПЬЮТЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Компьютерное оборудование представляет собой сложный участок цепи с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Его особенность заключается в том, что даже при приложении синусоидального напряжения ток участка в общем случае несинусоиден. В связи с этим актуальной задачей является исследование гармонического состава токов различной компьютерной техники, что стало целью настоящей работы.

В рамках работы решались следующие задачи:

- 1) запись осциллограмм тока компьютерного оборудования различных производителей при помощи анализатора качества электроэнергии типа Ресурс-UF2M (рис. 1);
- 2) получение амплитудного и фазового спектра тока для всех измерений;
- 3) анализ вида амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик тока в зависимости от мощности потребителей.



Рис. 1. Схема физического эксперимента

Результаты исследования могут быть использованы в разработке модели (схемы замещения) компьютерного оборудования для анализа несинусоидальных режимов трехфазных электрических цепей (электрических сетей) [1].

Литература

1. **Карташев И.И., В.Н. Тульский, Шамонов Р.Г.** и др.; под ред. Ю.В. Шарова; Управление качеством электроэнергии. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

Направление XII

**ГИДРОЭНЕРГЕТИКА
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
Hydropower and renewable
energy sources**

Руководитель направления:

Директор института гидроэнергетики
и возобновляемых источников энергии,

к.т.н., доцент

Шестопалова Татьяна Александровна

Секция 61

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Hydropower and renewable energy sources

Председатель секции:

к.т.н., доцент Шестопалова Татьяна Александровна

Секретарь секции: Кунакин Дмитрий Николаевич

В.Р. Кулик, студ.; рук. Е.В. Игнатьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗАТЕНЕНИЯ НА ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЭС

В работе представлена методика комплексной оценки влияния аэродинамического затенения на выработку электроэнергии и экономическую эффективность ветроэлектрических станций (ВЭС). Методика основана на применении моделей спутной струи Н.О. Йенсена в её практической имплементации И. Катича [1] и Г.К. Ларсена [2] с учетом характеристики коэффициента тяги, шероховатости подстилающей поверхности [3] и фактической плотности воздуха. Представлены результаты моделирования характеристик шероховатости подстилающей поверхности, отражающей сезонные и метеорологические изменения на площадке ВЭС, и коэффициента тяги с использованием разработанной авторами программы WTCurves, результаты которого прошли верификацию по данным реальных ВЭУ. Выполнена оценка чувствительности расчётов аэродинамических потерь [4] и показателей экономической эффективности ВЭС к изменению входных параметров. Установлено, что наибольшее влияние оказывают фактическая плотность воздуха (до $\pm 18\%$) и способ задания коэффициента тяги (до $\pm 16\%$), тогда как выбор модели спутной струи и параметров шероховатости подстилающей поверхности оказывает влияние менее 1%. Учёт аэродинамического затенения в экономических расчётах снижает значения NPV на 15–25%, увеличивает срок окупаемости до 8–9 лет и уменьшает IRR до 19–26%, что подчёркивает необходимость его включения в инженерно-экономическое моделирование ветроэнергетических проектов. Полученные результаты позволяют повысить точность прогнозирования выработки и обоснованность инвестиционных расчётов на этапе проектирования ВЭС.

Литература

1. **Katić I., Højstrup J., Jensen N.O.** A Simple Model for Cluster Efficiency, Proc. EWEA Conf. and Exhib., 7–9 Oct 1986, Rome (Italy), 407–410.
2. **Larsen G.C., Højstrup J., Aagaard H.M.** Wind fields in wakes, Proc. 1996 EU Wind Energy Conf., Göteborg (Sweden), 1996, 764–768.
3. **Thøgersen M.L., Ahsbahs T., Pedersen M.C., Sørensen T., Nielsen P., Grötzner A., Chun S.** Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence, EMD International A/S, Aalborg (Denmark), 2023.
4. **Deriugina G., Ignatov E., Kornev D.** Wind Turbines Wake Models Comparison, Proc. 2024 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi (Russia), IEEE, 2024, 271–276.

*Ю.Д. Кавойков, студ.; И.И. Бердышев, асп.;
рук. М.В. Бурмейстер, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ПРОВЕРКУ СООТВЕТСТВИЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ

В настоящее время в существующих электроэнергетических системах (ЭЭС) растёт число электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно фотоэлектрических и ветроэлектрических. Поскольку такие электростанции выдают электроэнергию на постоянном токе, они подключаются к ЭЭС через силовые преобразователи, при этом между источником и ЭЭС отсутствует механическая связь, из-за этого возникает ряд технологических проблем. Для решения этих проблем необходима разработка новых систем автоматического управления (САУ) силовыми преобразователями, например, системы виртуальной инерции (СВИ). На сегодняшний день отечественные и зарубежные нормативно-технические документы [1, 2] предъявляют требования к режимам работы энергоустановок на основе ВИЭ и их силовых преобразователей. На данный момент разработано множество модифицированных САУ, в том числе СВИ, но отсутствуют исследования на соответствие их нормативно-техническим требованиям.

Цель работы заключается в разработке программы испытания САУ силовых преобразователей на проверку к нормативно-техническим требованиям. На основе проведённого отечественного и зарубежного опыта можно выделить три группы требований к САУ силовыми преобразователями:

- 1) Требования к параметрам режима: частота, активная мощность, напряжение, реактивная мощность.
- 2) Требования к синхронизации.
- 3) Требования к координации со смежными САУ.

Для проверки САУ силовых преобразователей на соответствие нормативно-техническим требованиям разработана программа испытаний. В процессе тестирования проверялись требования к САУ силовыми преобразователями, в том числе СВИ.

Литература

1. **ГОСТ 34966.1–2023** Преобразователи силовые двунаправленные, подсоединенные к электросети. Часть 1 Общие требования.
2. **National Energy System Operator**. GC0137: Minimum Specification Required for Provision of GB Grid Forming (GBGF) Capability.

С.А. Кострюков, студ.;
рук. Ю.В. Гусева, к.ф.-м.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Современные темпы развития электроэнергетики способствуют улучшению энергетической безопасности и росту ее конкурентоспособности. Выработка электроэнергии с помощью ветро- и солнечных электростанций (ВЭС и СЭС) приводит к экономии традиционных видов топлива и снижает негативное воздействие объектов энергетики на окружающую среду. В этой связи, несмотря на то, что доля выработки электроэнергии в общей структуре производства не превышает 1%, необходимо улучшение конструктивных, технологических и экономических характеристик генерирующего оборудования ВЭС и СЭС. Кроме того, производство электроэнергии альтернативными источниками способствует сокращению выбросов в атмосферу углекислого газа, который приводит к усилению парникового эффекта. Отметим, что при горении традиционных видов топлива на ТЭС удельные выбросы углекислого газа достигают в среднем 900–1150 г/кВт·ч. Внедрение современных паросиловых установок, рассчитанных на супер-, сверхкритические параметры пара может позволить значительно уменьшить наступление парниковых газов в атмосферу по сравнению с агрегатами на до- и сверхкритические параметры пара, оценочно на 20–25%. Таким образом, разработка и совершенствование технических решений, направленных на повышение технико-экономические показателей работы ВЭС и СЭС позволит обеспечить более широкое применение и распространение нетрадиционных источников энергии для энергоснабжения промышленных потребителей.

Авторами работы созданы физические модели лопастного аппарата вертикально-осевого ветрогенератора. В лабораторных условиях проведены серии экспериментов и определены рабочие характеристики разработанных моделей ротора ветрогенератора. Выполнено критическое сравнение полученных данных с результатами экспериментальными исследованиями аналогичных ветрогенераторов [1, 2]. Полученные результаты могут быть использованы энергомашиностроительными организациями при проектировании лопастного аппарата вертикально-осевых ветрогенераторов новой конструкции.

Литература

1. **Шеръязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М. и др.** Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — Т. 23. — № 5. — С. 24–33.
2. **Янсон Р.А.** Ветроустановки. — М.: 2007. — 36 с: ил.

Ю.В. Гусева, студ.;

рук. Л.Р. Куш, к.т.н., доц. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ЛОПАСТНОГО АППАРАТА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Рост промышленного производства определяет потребность в увеличении объемов производства электрической энергии. В отечественной энергетике основная часть электроэнергии производится на тепловых электрических станциях за счет сжигания органического топлива. Небольшая доля электроэнергии, менее 1%, вырабатывается на ветро- и солнечных электрических станциях (ВЭС и СЭС). В районах со среднегодовыми скоростями ветра 6 м/с и более распространение получают ветрогенераторы с вертикальным расположением оси ротора. Невысокие значения коэффициента эффективности использования энергии ветра в пределах 14–16% не позволяют обеспечить широкое масштабирование ветроэнергетических установок данного типа. Кроме того, отсутствие отечественных производителей ветрогенераторов крупной электрической мощности и сервисных организаций, осуществляющих техническое обслуживание и ремонт ветроэнергетических установок, является дополнительными факторами, ограничивающими применение альтернативных источников для энергоснабжения потребителей в электроэнергетической системе. Таким образом, целью работы является повышение технико-экономических показателей ветроэнергетических установок с вертикальным расположением ротора на основе разработки методики расчета оптимального профиля лопастного аппарата ветроэлектроустановки.

В работе разработана методика расчета с обоснованием выбора оптимального профиля лопастного аппарата ротора ветрогенератора, создана физическая модель лопастного аппарата. В лабораторных условиях выполнены серии экспериментов по определению рабочих характеристик ветрогенератора. Проведен критический анализ и сравнение полученных результатов исследования с известными данными [1, 2].

Полученные результаты исследования могут быть применены энергетическими организациями на этапе сбора обосновывающих данных при проектировании ветрогенераторов вертикально-осевого типа с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Литература

1. Шерьязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М. и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — Т. 23. — № 5. — С. 24–33.
2. Янсон Р.А. Ветроустановки. — М.: 2007. — 36 с: ил.

*Е.В. Миронова, Е.Е. Полторацкий, студенты;
рук. М.Л. Артемьева, ст. преподаватель (ЧФ СВФУ, г. Анадырь)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Нами предлагается способ установки пьезоэлектрических генераторов в подошву обуви для выработки электроэнергии в качестве альтернативного источника питания.

Пьезоэлектрические генераторы — устройства, напрямую преобразующие механическую энергию (вибрации, давление, деформацию) в электричество за счет прямого пьезоэффекта, используются для автономного питания маломощной электроники, датчиков и систем мониторинга [1].

Принцип работы предлагаемого устройства основан на механическом воздействии на пьезоэлемент в форме пластины, расположенный в каблучке и носке обуви. Получаемая энергия накапливается в аккумуляторе, который находится вместе с контроллером во влагозащищенном подсумке на ремне. Пьезогенераторы соединены с подсумком проводом в защитной оплетке, а также используются влагозащищенные разъемы. В устройстве предусмотрена возможность расходовать часть вырабатываемой электрической энергии на собственные нужды, а именно обогрев подсумка с электроникой.

Данная конструкция предназначена для функционирования в условиях Арктики и Крайнего Севера.

Устройство способно заряжать: телефон, рацию, gps навигатор, gps-телефон.

В сравнении с существующими переносными источниками электроэнергии, такими как, портативные ветрогенераторы, гидрогенераторы, солнечные панели, дизельные генераторы, предлагаемое устройство имеет ряд преимуществ: не зависит от силы ветра, напора воды, продолжительности солнечной инсоляции, наличия топлива, отсутствие загрязнения окружающей среды, легкая переноска, возможность использования в любые погодные условия, а также выработка энергии независимо от месторасположения.

Литература

1. **Рычина Т.М., Зеленский А.В.** Электрорадиоэлементы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Сов. радио, 1976 — 336 с.

*И.В. Степанюк, студ.; рук. М.Л. Артемьева, ст. преподаватель
(Чукотский филиал СВФУ, г. Анадырь)*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЯРАНГИ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

Целью является разработка устройства для обеспечения оленеводов Чукотки источником света. В качестве источника было выбрано устройство, работающее от лучей солнечного света. Существуют разные способы получения электрической энергии в полевых условиях для оленеводов [1].

Принцип его работы заключается в улавливании солнечных лучей, и преобразовании его в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических панелей. Потоки солнца будут улавливаться специальным гранённым куполом, грани которого преломляют лучи и направляют на солнечную панель.

Устройство состоит из следующих составляющих:

1. Гранённый купол.
2. Солнечная панель.
3. Акумуляторная батарея АКБ — хранение сгенерированной энергии, для работы устройства в тёмное время суток.
4. Контроллер заряда — оптимизация работы системы.
5. Светодиодная лампочка.

Местом использования устройства является яранга. Устройство будет установлено на вершине купола яранги, закреплена к штырям с помощью специальных элементов крепления. Купольная часть будем снаружи, а освещаемая часть будет находиться внутри яранги. За основу были взяты следующие данные: диаметр яранги 7 метров, высота 4 метра. В следствии расчётов, итоговая площадь покрытия светом составила 22 метра.

Стоимость устройства была рассчитана, основываясь на ряде факторов: количество вырабатываемой энергии, время эксплуатации, материал солнечной панели, ёмкость аккумулятора, требуемая мощность, напряжение и так далее. Итоговая стоимость выходит около 10 тыс. рублей.

Литература

1. **Айневтегин, С.В.** Устройство получения электроэнергии в труднодоступных регионах / С.В. Айневтегин, М.Л. Артемьева // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (Тэгуа-2023): Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н.С. Иванова, Якутск, 06–09 декабря 2023 года. — Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2023. — С. 10–11. — EDN VAVAMC.

Г.А. Петленко, студ.; рук. Д.В. Шилин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ

В последние годы математическое моделирование становится ключевым инструментом проектирования пневматических и гидравлических систем, применяемых в составе современных роботизированных комплексов. Такие системы используются для управления манипуляторами, исполнительными органами, автоматическими захватами и перемещающими механизмами, что существенно расширяет функциональные возможности промышленных роботов [1, 2].

Использование моделирования позволяет заблаговременно выявить особенности динамики и устойчивости приводных систем, оптимизировать режимы работы, повысить точность позиционирования и надёжность аппаратуры в условиях реального производства. Особенно актуально применение моделей для анализа взаимодействия между механическими компонентами и рабочей средой — воздухом или гидравлической жидкостью [1].

В пневматических системах моделирование даёт возможность учитывать влияние сжимаемости воздуха, запаздывания наполнения камер, утечек и трения движущихся элементов. Это позволяет повысить точность управления положением манипуляторов, реализовать плавные скоростные профили и минимизировать энергопотери. Аналогично, в гидравлических системах математическая модель учитывает характеристики жидкости, параметры насосов и дросселей, а также особенности гидродинамики и упругости трубопроводов [1].

Компьютерное моделирование служит неотъемлемой частью при выборе оптимальной конструкции исполнительных органов, подборе параметров контуров управления и синтезе программ для контроллеров робота. Благодаря виртуальным испытаниям исключается необходимость частых и дорогих экспериментальных постановок, сокращаются сроки подготовки к запуску производства и снижаются риски выхода из строя ключевых компонентов комплексов.

Таким образом, интеграция современных методов моделирования в процесс создания роботизированных систем с пневматическими и гидравлическими приводами позволяет существенно повысить уровень автоматизации, надёжности и эффективности промышленного производства.

Литература

1. **Vajpai J., Chopra T.** Fault diagnosis in benchmark process control system using stochastic gradient boosted decision trees // *Int. J. Soft Comput. Eng.* — 2011.
2. **Донской А.С.** Математическое моделирование процессов в пневматических приводах: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 121 с.

М.И. Лукьянчиков, студ.;
рук. А.В. Волков, д.т.н., профессор (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСА КМ 65-50-160

Неотъемлемым фактором работы каждого насоса является шум. Насосы, используемые для водоснабжения в многоквартирных домах, располагаются в подвальных помещениях, что в свою очередь может создавать неудобства для жильцов первого этажа. В этой связи необходимо создание насоса с улучшенными акустическими характеристиками, для улучшения условий проживания людей. Для разработки такого агрегата необходимо оценить акустические характеристики уже существующих насосов. Было принято решение в качестве исследуемого объекта взять насос КМ 65-50-160 и получить экспериментальные данные в диапазоне его рабочих параметров. В качестве прибора для измерения шума используется шумомер-виброметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А. Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

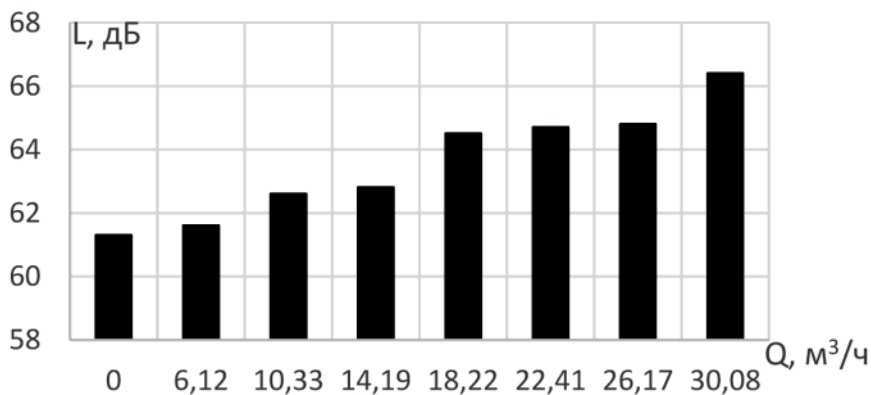


Рис. 1. Результаты эксперимента

На следующем этапе будет проводится расчет в программном комплексе FlowVision с последующим сравнением расчетных данных с экспериментальными, что в перспективе позволит создать метод оценки акустических характеристик насосов на этапе их разработки.¹

1 Данный материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты» о создании новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей — Уникальный номер проекта FSWF-2025-0004. Соглашение №075-03-2025-457/10 от 06.06.2025 г. Тема исследований: «Расчётно-теоретические и экспериментальные исследования по созданию эффективных энергетических комплексов на основе гидроресурсов с возможностью аккумулирования энергии и повышенной манёвренностью регулирования».

В.А. Пронина, студент;
рук. М.В. Бурмейстер, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СТАТИЗМА ПО ЧАСТОТЕ

Для поддержания частоты в системе необходимо соблюдать баланс активной мощности, в настоящее время активно развиваются возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечные (СЭС) и ветроэлектрические станции (ВЭС). Они имеют стохастический характер, поэтому поддержание баланса активной мощности в энергосистеме со значительным содержанием ВЭС и СЭС становится усложняется. Поэтому необходимо реализовывать новые подходы к управлению данными источниками, в частности ГОСТ 58092.3.2-2023 предъявляет требования к участию силовых преобразователей, с помощью которых ВИЭ подключаются к энергосистеме, в первичном регулировании частоты [1]. Возможной реализацией для данного требования является применение для преобразователя системы управления на основе статизма по частоте [2]. Данная система позволяет автоматически изменять выдаваемую в электрическую сеть активную мощность, вырабатываемую СЭС и ВЭС (совместно с системой накопления электроэнергии) пропорционально величине отклонения частоты.

Цель работы — разработка имитационной модели силового преобразователя с управлением на основе статизма по частоте в *Matlab Simulink*.

В результате выполненной работы была разработана имитационная модель преобразователя с системой управления на основе статизма по частоте [2]. Модель преобразователя состоит из модулей *IGBT*-транзисторов, блока широтно-импульсной модуляции, системы управления: сумматоры, интегратор, фильтр нижних частот, усилитель. Входными сигналами для системы управления являются данные по активной мощности (уставка и текущее значение), статизм и частота в системе; выходными — управляющие воздействия для открытия и закрытия *IGBT*-транзисторов.

Разработанная модель будет использована в дальнейшем авторским коллективом для исследования электромагнитных и электромеханических переходных процессов в изолированной энергосистеме с ВЭС и СЭС.

Литература

1. ГОСТ Р 58092.3.2–2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии.
2. D'Arco, S.; Suul, J.A. Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids // IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5, pp. 394–395.

Р.Д. Семяшкин, студ.;
рук. М.В. Козлова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА

Наиболее распространённый способ получения тепловой энергии — сжигание топлива — имеет ряд существенных недостатков. Главными проблемами являются ограниченность на Земле пригодного для сжигания топлива и загрязнение атмосферы парниковыми газами. В связи с этим, активнее применяются возобновляемые источники энергии в особенности, использующие энергию Солнца.

Эффективность гелиоустановок, преобразующих солнечную энергию в тепловую, зависит от интенсивности светового излучения. Наибольшая способность улавливать поток солнечных лучей характерна для солнечных концентраторов. Поэтому актуальным является разработка программных средств, позволяющих определять основные характеристики установок данного типа.

Авторами в среде Visual Basic for Applications разработана программа автоматического расчета основных параметров параболоцилиндрического концентратора по имеющейся методике [1]: поток солнечного излучения, падающего на нормальную к лучу поверхность приемника, температура теплоносителя на выходе из приемника, полезная мощность концентратора, максимальный коэффициент концентрации для выбранной конструкции, определение данных характеристик может выполняться для различных городов РФ.

С использованием разработанной программы получена зависимость выработанной за месяц тепловой энергии концентратора для разных месяцев и городов (рис. 1).

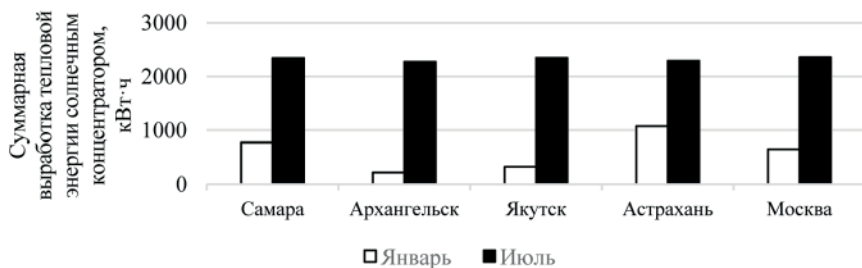


Рис. 1. График зависимости суммарной за месяц полезной мощности солнечного концентратора с вакуумированным внутренним пространством для разных городов

Литература

1. Дж. Даффи, У. Бекман Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Дж. Даффи, У. Бекман — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2013 — 888 с.

М.В. Колягин, студ.;
рук. С.Н. Черкасских, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Современные высоковольтные выключатели используются для обеспечения защиты энергосистем в случаях короткого замыкания и позволяют локализовать аварийный участок. В настоящее время в качестве дутогасящей среды в выключателях высокого и сверхвысокого напряжения используется элегаз [1]. С ростом напряжения возрастает требуемая мощность приводов элегазовых выключателей, что приводит к целесообразности использования гидроприводов [2].

Они характеризуются кратковременным периодом работы, а основную часть времени гидропривод обеспечивает постоянную готовность к действию, находясь в режиме ожидания. В связи с этим в состав гидропривода входит пневмогидравлический аккумулятор. Для его зарядки используется насос высокого давления, работающий в старт-стопном режиме. Для устранения влияния температуры на характеристики гидропривода вместо пневмогидравлического аккумулятора может применяться пружинный аккумулятор.

Для управления высоковольтными выключателями с напряжением до 220 кВт обычно используются пилотные однокаскадные электрогидравлические распределители. При напряжениях от 220 до 550 кВт применяются двухкаскадные распределители, а при напряжениях более 550 кВт переходят на трехкаскадные схемы. Для повышения герметичности в выходных каскадах гидрораспределителей используются клапанные запорно-регулирующие элементы.

Исполнительный гидроцилиндр подключается по дифференциальной схеме, что обеспечивает повышение быстродействия гидропривода. Для обеспечения безударной работы в конце хода поршня реализуется его торможение за счет дроселирования потока.

Литература

1. **Аванесов, В.Л.** Элегазовые выключатели в энергетике: плюсы и минусы / В.Л. Аванесов // Проблемы и перспективы развития науки и образования : Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция, Тверь, 13 февраля 2024 года. — Тверь: ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия», 2024. — С. 243–246. — EDN OUWIKC.
2. **Liu W, Xu B, Yang HY, et al.** Hydraulic operating mechanisms for high voltage circuit breakers: Progress evolution and future trends // Sci ChinaTech Sci. — 2011. — № 54 (1). — PP. 116–125. — DOI 10.1007/s11431-010-4154-6.

*С.А. Макулов, И.Н. Нефедов, студ.;
рук. Р.В. Булатов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ МАХОВИЧНЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Маховичные системы накопления электроэнергии (МСНЭ) являются актуальной и перспективной технологией ввиду растущего спроса на надежные и эффективные способы обеспечения баланса мощности в энергосистемах, широкого внедрения возобновляемых источников энергии и для обеспечения устойчивого электроснабжения в условиях увеличения потребления электроэнергии. Современные МСНЭ обладают высоким быстродействием, КПД, высоким сроком службы, а также высокой удельной энергией по сравнению со значительным количеством типов накопителей [1, 2].

Целью работы является анализ существующих типов МСНЭ и областей их применения для поиска оптимального решения по внедрению таких накопителей в энергосистемы. Для этого в рамках работы были проанализированы предложения на отечественном и зарубежном рынке МСНЭ, проведена оценка уровня технологического развития типов МСНЭ, сопоставлены технические и экономические характеристики.

В результате работы были определены типы МСНЭ наиболее актуальные к применению для решения задач регулирования частоты и напряжения, регулирования графиков мощности с учетом особенностей функционирования объединенных и изолированных энергосистем в России. Представлено технико-экономическое сопоставление различных типов МСНЭ. Разработаны рекомендации по модернизации существующих МСНЭ отечественного производства для повышения их энергоемкости, КПД и срока службы.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и внедрении МСНЭ для решения задач регулирования параметров режима энергосистем, а также при интеграции объектов ВИЭ в изолированные и объединенные энергосистемы.

Литература

1. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов. Энергоатом. 1991.
2. Хаошу Лин, ЧжичэньШэнь, Цзихун Ван. Обзор технологий маховичных систем накопления энергии: конструкция ротора, анализ потерь и применение магнитных подшипников // Журнал накопления энергии. — 2025. — Т. 99. — Ст. 113677.

Д.А. Шистарев, студ.;
рук. И.А. Волощук, м.н.с. (НИУ «МИЭТ», Москва)

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОРТАТИВНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В настоящее время актуальной областью развития энергетики является преобразование остаточной тепловой энергии в электрическую благодаря термоэлектрическим генераторам (ТЭГ). Серьезным ограничивающим фактором повсеместного внедрения ТЭГ является малый КПД, который в первую очередь определяется добротностью термоэлектрических материалов (Z). Значительного увеличения Z можно достичь увеличением рассеяния фононов кристаллической решетки, приводящим к снижению теплопроводности. Снижение фононной составляющей теплопроводности обеспечивается уменьшением размеров частиц исходных термоэлектрических материалов при размоле в шаровой мельнице.

В лабораторных условиях, когда число исследуемых составов материалов велико, а объём каждого образца мал, коммерческие шаровые мельницы, рассчитанные на большую загрузку, мало пригодны. Получаемый в ходе размолы микро- и наноразмерный порошок при длительном хранении может быть гигроскопичным и склонным к окислению, что приводит к ухудшению его характеристик. Также критична воспроизводимость размеров частиц при измельчении, что достигается автоматизацией процесса размолы. Таким образом, целью работы была разработка и изготовление настольной автоматизированной лабораторной шаровой мельницы с программируемым профилем размолы и малым объёмом загрузки материала.

Для реализации поставленной задачи была разработана конструкция шаровой мельницы и ее 3D-модель. Разработанная мельница состоит из 2 шаговых двигателей и управляющего контроллера с разработанным ПО. Первый двигатель отвечает за наклон стакана с размолем в диапазоне $\pm 130^\circ$ от вертикали и позволяет создавать качение во время размолы. Второй двигатель управляет вращением и вибрацией, позволяя вращать стакан с материалом со скоростью до 1100 об/мин и создавать вибрацию на частоте до 250 Гц. Это обеспечивает тщательное перемешивание пробы и, как следствие, узкое распределение частиц по размерам.

Для апробации работы разработанной автоматизированной шаровой мельницы были подготовлены навески крупной фракции (с размерами частиц более 1 мм) материалов n- и p-типа: $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.8}\text{Se}_{0.2}$ и $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$. Исследования распределения размеров частиц производились методом динамического рассеяния света. Результаты показали, что средний размер частиц, получаемых при помощи разработанной мельницы, не превышал 10 мкм.

А.А. Пахмутова, И.С. Полыгалин,
Н.А. Сараев, Д.П. Яковлев, студ.;
рук. А.А. Волошин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Солнечная энергетика — один из самых быстрорастущих сегментов ВИЭ благодаря постоянному снижению стоимости оборудования и повышению эффективности технологий. Однако ключевым вызовом, сдерживающим массовое распространение солнечной генерации, является ее нестабильность и изменчивость. В связи с этим разработка и внедрение моделей искусственного интеллекта (ИИ), способных прогнозировать выработку электроэнергии с учётом множества факторов, представляется крайне актуальной задачей. В частности, в России Правила оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ) [1] жёстко регламентируют допустимые отклонения: фактические объёмы выработки мощности солнечных электростанций не должны отклоняться от почасовых планов более чем на 10% от установленной мощности.

В работе были проанализированы ретроспективные данные с солнечной установки (СУ), расположенной на территории университета. Её конфигурация включает инвертор SolarRiver 3400TL-D и две цепочки по 8 солнечных панелей TSM-200B общей установленной мощностью 3,2 кВт. Для выявления зависимостей данные о выработке СУ были сопоставлены с архивными метеоданными, полученными за 2024–2025 годы из открытого API сервиса OpenWeather. Проведённый корреляционный анализ выявил, что мощность выработки СУ имеет умеренную зависимость от температуры, уровня облачности и времени суток. При этом влияние влажности и осадков оказалось слабовыраженным.

На основе собранной информации был сформирован набор данных для обучения машинных моделей. В ходе экспериментов было протестировано 10 различных алгоритмов, включая несколько реализаций градиентного бустинга и архитектур нейронных сетей. Наилучший результат по метрикам качества продемонстрировала модель *LightGBM* (*Light Gradient Boosting Machine*): коэффициент детерминации $R^2 = 0,84$, среднеквадратичная ошибка $RMSE = 1,89\%$, средняя абсолютная ошибка $MAE = 0,74\%$.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».

С.А. Щербаков, асп.; рук. Е.В. Шелковой, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ИЗОЛИРОВАННОМ ЭНЕРГОУЗЛЕ

Гибридные энергокомплексы замещают дизельные электростанции в изолированных энергоузлах Дальнего Востока и Арктики, в том числе в опорных населенных пунктах Северного Морского Пути. Для поддержания необходимого уровня напряжения и частоты в сети во время работы с остановленными дизель-генераторами используются опорные накопители энергии [1]. Актуальной становится задача выбора параметров накопителя для обеспечения самозапуска двигателей портовой инфраструктуры.

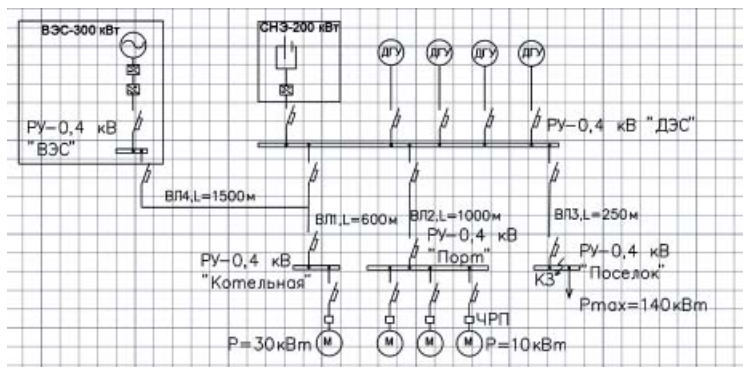


Рис. 1. Расчетная схема

В работе исследуется режим самозапуска двигателей портовых грузоподъемных кранов и насосов водогрейной котельной в изолированном энергоузле с гибридным энергокомплексом при восстановлении напряжения после ликвидации короткого замыкания в сети.

В результате моделирования показано, что при выборе мощности накопителя необходимо учитывать броски тока при групповом самозапуске двигательной нагрузки. Кроме того, показана важность правильного выбора расчетных условий, таких как вид и тип короткого замыкания, продолжительность отключения и др.

Результаты исследования показывают необходимость разработки методики выбора параметров систем накопления, включая корректный выбор расчетных условий при расчете токов КЗ в изолированных энергоузлах с гибридными энергокомплексами.

Литература

1. Шелковой Е.В., Кабанов В.А. — Технологии гибридной генерации для локальной энергетики Дальнего Востока и Арктики // Энергоэксперт. № 3, 2024. С. 12–18.

А.С. Мишин, студ.; рук. О.В. Журавлев к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ»)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ГИБКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ВЫРАБОТКИ СЭС ПО ТРЕБОВАНИЯМ УМНОЙ СЕТИ

С увеличением проникновения солнечных электростанций (СЭС) в силу динамического изменения климат-параметров в составе электроэнергетических систем возникает необходимость разрешения ряда задач регулирования мощности для обеспечения стабильности умной электросети. В реальных условиях управления выработкой СЭС сложно установить точную математическую модель из-за нелинейности характеристической кривой, её динамической изменчивости, вызванной изменениями климат-параметров (освещенности и температуры). В данной работе представлены новый метод и модели управления регулированием мощности выработки СЭС в контуре постоянного тока по требованиям умной сети. Разработки базируются на концепции поиска гибких точек мощности [1]. Регулирование рабочего напряжения осуществляется методом стягивающего коэффициента, как цифровое встраивание в FRPT-контроллеры Сценарий моделирования, как и физический объект, работает в реальном времени и предполагает наличие значений только двух электрических параметров: тока и напряжения, без использования дополнительных климат-датчиков. Разработаны и промоделированы версии расчетов режимов резервирования, нарастания и постоянной величины мощности СЭС. Управление, разработанное авторами, обеспечивает высокоскоростное целевое стягивание с требуемыми значениями умной сети без существенных пульсаций тока и напряжения. Значимые преимущества разработанного метода управления — алгоритмическая простота, легко реализуемая простым кодом, быстрая сходимость без динамических параметрических настроек и ориентации на номинальные характеристики, имеет би-направленность действий по отношению к требованиям умной сети, исключает повторные инициализации [2]. Применимость и преимущества метода подтверждены экспериментами в рамках модельно-ориентированного проектирования.

Литература

1. Peng Q., Sangwong A., Yang Y., Blaabjerg F. Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems // SolarEnergy, v.210, 2020, p. 115–127.
2. Журавлев О.В., Мишин А.С. Гибкие алгоритмы отслеживания режимов постоянной и резервной мощности фотоэлектрических систем методом стягивающего коэффициента. Журнал ЭНЕРГОЭКСПЕРТ, №3, 2025, С. 44–50.

Е.А. Лебедева, асп.; рук. Ю.В. Монаков, к.т.н. («НИУ МЭИ»)

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ

Современные водородные технологии открывают уникальные возможности для надежного энергоснабжения изолированных регионов России, таких как Сахалинская область, Камчатка, Чукотка, Республика Саха (Якутия) и Магаданская область. Географическая изоляция и сложный климат делают традиционное энергоснабжение чрезвычайно дорогим и уязвимым. Альтернативное электроснабжение предполагает использование накопителей большой мощности, например, водородные системы. Одной из наиболее острых проблем водородных накопителей является вопрос эффективного хранения водорода.

В работе изучены существующие методы хранения водорода, используемые в энергетическом секторе, а также проведено их сравнение. Были проанализированы разнообразные варианты, включая:

1. Хранение жидкого водорода,
2. Адсорбционное хранение водорода,
3. Абсорбционное хранение водорода в металлогидридах,
4. Компрессированное хранение водорода [1].

Большинство представленных технологий обладают серьёзными недостатками либо подходят лишь для мобильных применений. Особенно актуальным стал вопрос поиска оптимального варианта для стационарного использования в удалённых регионах.

Основным выводом исследования стало определение наиболее подходящего метода хранения водорода для изолированных энергосистем — хранение водорода в газообразном состоянии под умеренно повышенным давлением. Такая технология позволяет минимизировать себестоимость эксплуатации и технического обслуживания, повысить безопасность благодаря снижению риска взрыва или утечки, повышается устойчивость к внешним воздействиям. Также становится проще транспортировка и установка в полевых условиях.

Например, на Сахалине многие населённые пункты находятся далеко друг от друга, часто испытывают дефицит электрической энергии. Применяя предложенный метод хранения водорода, можно создать независимый источник чистой энергии, снижая зависимость от привозного топлива и повышая надёжность подачи электричества населению и предприятиям.

Литература

1. Гафиятуллин Д.М., Сироткина Л.В. Технологии хранения водорода // Теория и практика современной науки. 2024. № 6 (108). С. 49–51.

*И.А. Стрижевский, студ.; В.А. Кабанов, асп.;
А.Н. Дорошин, соиск.;
рук. К.В. Суслов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВДЭК И МАЛЫХ ТЭЦ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ЦПКС

Энергоснабжение изолированных территорий Дальнего Востока требует решений, способных снизить топливную зависимость и обеспечить устойчивую работу в экстремальных условиях. В исследовании выполнено сравнение двух ключевых технологий: автоматизированных ветродизельных комплексов (ВДЭК) и малых угольных ТЭЦ на основе циркулирующего псевдосжиженного кипящего слоя (ЦПКС).

Гибридные комплексы представляют собой технологию, ориентированную на максимальное использование ветропотенциала. Их ключевое преимущество — сокращение потребления дизельного топлива за счёт приоритета выработки ВЭУ и оптимизированного режима запуска ДЭС. Накопители энергии сглаживают переменчивость ветра и продлевая срок службы дизельных электроустановок [1]. Однако эффективность комплекса принципиально зависит от доступных ресурсов ветра.

Малые ТЭЦ с технологией ЦПКС делают ставку на стабильность и топливную гибкость. Технология ЦПКС допускает использование низкосортных углей месторождений Дальнего Востока, уменьшает выбросы NO_x и SO_2 за счёт низкотемпературного горения и известняковых добавок, а также обеспечивает одновременную выработку тепла и электричества [2]. В отличие от гибридных комплексов, ТЭЦ с технологией ЦПКС обладают устойчивым круглогодичным режимом работы, не зависящим от погоды. Основные ограничения связаны с более значительными капитальными вложениями на этапе строительства и необходимостью организации системы утилизации золошлаковых отходов.

Сравнение показало, что гибридные комплексы обеспечивают максимальную экономию топлива и экологическую чистоту при наличии высоких ветровых ресурсов, но и ограничены ими же. Малые ТЭЦ с технологией ЦПКС выигрывают по надёжности, предсказуемости и масштабируемости, обеспечивая низкую стоимость энергии в долгосрочной перспективе, особенно в районах с доступом к местным угольным ресурсам.

Литература

1. **Mikhaylovskaya A.V., Kiselev I.A., Tuguzova T.F.** Study of the Intelligent Control and Modes of the Arctic-Adopted Wind–Diesel Hybrid System // *Energies*. 2021. Т. 14. № 14.
2. **Рябов Р.Я., Елагин А.Н., Мягков Г.И.** Анализ современного состояния и развития технологии сжигания в циркулирующем кипящем слое // *Теплоэнергетика*. 2021. № 8.

Д.В. Мылкин, мл. науч. сотр.;
рук. А.А. Дружинин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУФЕРНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ЦЕЛЬЮ ВЫРАВНИВАНИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ

Работа посвящена анализу возможности применения модульных микроГАЭС для уменьшения дискретности суточного графика нагрузки изолированных энергосистем и повышения эффективности функционирования локальных энергетических комплексов. Высокая манёвренность таких установок позволяет оперативно реагировать на кратковременные изменения потребления, обеспечивая быстрое увеличение или снижение мощности и снижая нагрузку на менее гибкие источники энергии. Существенную роль играет ночной (насосный для микроГАЭС) режим: в периоды минимального энергопотребления избыточная мощность обеспечивающих постоянный уровень покрытия энергопотребления и более инертных энергоисточников используется для заполнения верхнего бьефа, что формирует запас потенциальной энергии, доступный для покрытия дневных пиков без необходимости изменения режима работы инертных мощностей.

Модульный принцип конструкции единичных мощностей и использование гидроагрегатов различных быстро возводимых исполнений дают возможность эффективно наращивать установленную мощность и адаптировать энергокомплекс к индивидуальным условиям, обеспечивая предсказуемость технических и экономических характеристик. При расчётах учитываются ключевые параметры: высота верхнего бьефа, объём резервуаров, установленная и суммарная мощности модулей, длительность пиковых режимов и особенности холодного периода, влияющие на внутренний расход и энергетический баланс. Использование буферных энергокомплексов на основе микроГАЭС позволяет сформировать дополнительный резерв манёвренных мощностей и способствует выравниванию графика нагрузки, обладающего более высокой чувствительностью к изменению уровня энергопотребления в суточном цикле, чем в случае централизованной энергосистемы, улучшая интеграцию ВИЭ и традиционных источников и снижая вариативность суточных графиков потребления (см. рисунок 1).

Благодарности. Данный материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты» о создании новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей — Уникальный номер проекта FSWF-2025-0004. Соглашение №075-03-2025-457/10 от 06.06.2025 г.

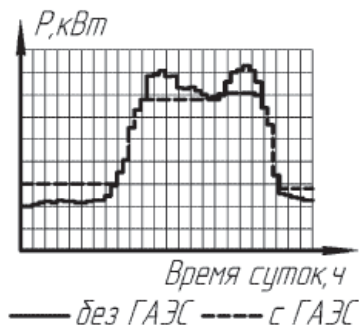


Рис. 1. Суточный график нагрузки децентрализованной энергосети

М.А. Бирюлин, асп.; рук. А.В. Волков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ БИОБЕЗОПАСНОСТИ ПЛ-ТУРБИНЫ ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛОПАСТЕЙ

Несмотря на то, что гидроэлектростанции считаются чистыми источниками энергии, их длительная эксплуатация может оказать негативное влияние на биоресурсы, поэтому важно обеспечить высокий уровень биобезопасности проточной части гидротурбин. Существует ряд широко известных способов добиться повышения биологической безопасности [1]:

- Устранение зазоров между лопастями и рабочим колесом;
- Изменение расположения лопаток направляющего аппарата относительно стационарных колон;
- Изменение формы лопасти (толщина, угол охвата и др.).

Очевидно, что подобные изменения сказываются на энергетической эффективности гидротурбин. В связи с этим возникает потребность в создании не только биобезопасной, но и высокоэффективной, конкурентоспособной конструкции гидротурбины.

С помощью численного моделирования в пакете FlowVision и дальнейшей верификацией на экспериментальном стенде, было проведено исследование отображающее зависимость энергоэффективности от показателя биобезопасности для решения, связанного с изменением толщины лопасти. Исследование проводилось для трех вариантов лопастей (базовая толщина, увеличенная в 2 раза, увеличенная в 3 раза), а биологическая безопасность оценивалась с помощью методики разработанной на кафедре ГТМ.

Увеличение толщины в 2 раза показало повышение биобезопасности примерно на 3% при снижении КПД на 0,3%, дальнейший прирост в толщине снизил КПД уже на 0,5% при повышении биобезопасности на 20%. Обеспечение высокого показателя выживаемости происходит за счет снижения КПД и уменьшения рабочего диапазона турбины, что приводит к экономической нецелесообразности использования данного метода вне комбинации с иными повышающими эффективность и безопасность турбины способами.

Литература

1. **Volkov, A.V., Lyapin, V.Y., Druzhinin, A.A. et al.** Methods for Rendering Biosafety of Elements in Flow Paths of Hydraulic Turbines. Therm. Eng. 70, 932–938 (2023).

А.А. Гузеев¹, асп.; рук. Н.М. Савченкова¹, к.т.н., доц.;
И.Ф. Самсон², к.т.н., доц.

(¹НИУ «МЭИ», Москва; ²INTEC, Santo Domingo)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Представлена комплексная математическая модель нестационарного теплового режима солнечного коллектора солнечного холодильника адсорбционного типа [1]. Модель основана на решении системы уравнений теплового баланса для всех элементов конструкции: поверхности цилиндрического абсорбера, защитного стекла, теплоизолированных стенок корпуса и воздушной полости коллектора. Особое внимание уделено учету взаимного лучистого теплообмена между поверхностями системы. Для определения угловых коэффициентов излучения применен метод перекрещенных веревок [2], позволивший получить аналитические выражения для форм-факторов всех пар взаимодействующих поверхностей. Конвективный теплообмен описан с использованием критериальных уравнений подобия, учитывающих свободную конвекцию у горизонтальных и вертикальных поверхностей [3].

Численное исследование динамики нагрева поверхности цилиндрического абсорбера показало нелинейный характер роста температуры во времени. Установлено, что полезный тепловой поток, передаваемый внутрь абсорбера, существенно снижается в процессе работы вследствие экспоненциального роста теплопотерь через излучение и конвекцию. Разработанный итерационный алгоритм расчета демонстрирует устойчивую сходимость на каждом временном шаге и позволяет прогнозировать температурные поля всех элементов системы в произвольный момент времени. Модель представляет практическую ценность для интеграции в комплексную систему проектирования СХАТ и может быть использована для оптимизации тепловых характеристик солнечного коллектора при варьировании его геометрических параметров и свойств материалов.

Литература

1. **Самсон И.Ф.** Совершенствование характеристик и разработка метода расчета солнечной адсорбционной холодильной установки периодического действия: дис. канд. тех. наук: 05.04.03. — М., 2015 — 132 с.
2. **Hottel H.C., Sarofim A.F.** Radiative Transfer. McGraw-Hill, 1967. 520 p.
3. **Incropera F.P., DeWitt D.P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, 2002. 997 p.

*А.В. Филатов, мл. науч. сотр., М.О. Шейкин, мл. науч. сотр.,
А.А. Дружинин, к.т.н., доц.;
рук. А.К. Лямасов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

УСКОРЕННАЯ МЕТОДИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ НАСОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ТОКА

Разработка высокоэффективных многоступенчатых насосов предъявляет повышенные требования к точности моделирования течения в проточных частях рабочих колес и межступенчатых трактов насосов. Особенно критично это для насосных агрегатов, применяемых в составе гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), выполненных по трёх- и четырёх машинным схемам, где каждая ступень определяет суммарные энергетические показатели и устойчивость режима при работе в энергосети. В таких системах неточности в проработке геометрии меридианной проекции и учёте гидравлических потерь приобретают накопительный эффект от ступени к ступени, а значит, традиционное полномасштабное 3D-моделирование требует чрезмерно высоких вычислительных затрат на ранних этапах проектирования.

Предлагаемая ускоренная методика основана на решении модифицированного эллиптического уравнения для функции тока в осесимметричной постановке. Функция тока позволяет получить распределение расхода и линий тока в меридианном сечении без необходимости выполнять полный расчёт методом конечных элементов (МКЭ). Это обеспечивает возможность оценки структуры течения, локальных сужений, зон возможного ухудшения гидравлической эффективности и конфигурации средней линии тока.

Геометрия втулочных и покрывных поверхностей задаётся NURBS-кривыми, обеспечивающими точное описание реальной CAD-модели и возможность последующей параметрической оптимизации её формы. По полученным NURBS-границам строится регулярная сетка меридианной области, после чего применяется вариационная постановка и численное решение методом Галеркина. Результатом решения является поле функции тока, по изолиниям которого оцениваются ключевые параметры проточной части: локальная ширина канала, кривизна траектории, равномерность распределения расхода. Такая информация позволяет осуществить предварительную фильтрацию неэффективных вариантов геометрии, существенно сокращая число последующих трёхмерных CFD-расчётов.

Благодарности. Данный материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты» о создании новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей — Уникальный номер проекта FSWF-2025-0004. Соглашение №075-03-2025-457/10 от 06.06.2025 г.

К.Е. Денисов, асп.; рук. А.К. Лямасов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА АДАПТИВНЫХ ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Разработка высокоэффективных тихоходных центробежных насосов (ЦН) является актуальной задачей в связи с их востребованностью и, одновременно, низким КПД. В поисках нового решения задачи улучшения основных целевых функционалов тихоходных ЦН была предложена концепция адаптивной лопастной решётки (ЛР) рабочего колеса (РК) ЦН. Основная суть адаптивной ЛР состоит в том, что цилиндрические лопасти, находящиеся в проточной части РК постоянной ширины, могут вращаться, каждая относительно своей оси вращения, наподобие того, как это устроено в направляющих аппаратах гидротурбин.

Известно, что с ростом подачи гидродинамическое усилие, воздействующее на ЛР со стороны перекачиваемого потока, увеличивается. Регулировать положение лопасти может правильно спроектированный пружинный элемент, который оказывает усилие на лопатку в противоположном направлении. Таким образом, каждой точке на напорно-расходной характеристике насоса соответствует своё положение ЛР.

Проведённые гидродинамические расчёты, а затем, и натурный эксперимент показали, что если положение ЛР будет меняться с ростом подачи РК определённым образом, то это позволит изменить основные характеристики насоса так, что развиваемый напор левее номинальной подачи будет меньше, чем у аналогичного насоса с тем же РК и ЛР, но у которого ЛР фиксирована. За счёт этого снижается потребляемая насосом мощность, а КПД остаётся неизменным (рис. 1). Полученные результаты можно интерпретировать как улучшение общей энергоэффективности насоса за счёт снижения потребляемой им мощности в зоне малых подач, где происходит регулирование задвижкой.

Описанный в данном материале механизм адаптивной ЛР зарегистрирован в реестре ФИПС как патент на полезную модель № 235479 «Рабочее колесо центробежного насоса с пружинным механизмом», а также, зарегистрирована программа ЭВМ № 2025-П084 «Программа для расчета гидродинамического усилия на лопасти», предназначенная для численного определения значения усилия, действующего со стороны перекачиваемого потока на лопасть, на основе данных гидродинамического расчёта.

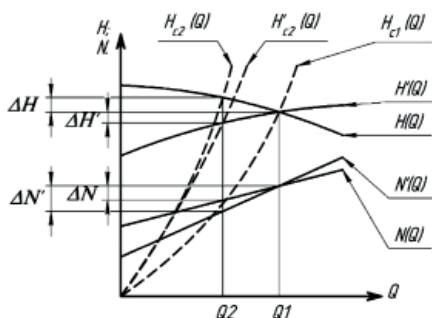


Рис. 1. Вид характеристик ЦН с адаптивной и фиксированной ЛР

Д.А. Юрьев, мл. науч. сотр.; А.К. Лямасов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДРЕЗКИ И УГЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛОПАСТЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОМОЩНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ГИДРОМУФТ

Обеспечение эффективной и надёжной работы насосных агрегатов является ключевой задачей для промышленности и энергетики, где насосы составляют значительную долю энергопотребления и функционируют в широком диапазоне режимов. Существенным элементом повышения эффективности является регулирование рабочих параметров, при этом регулируемые гидромуфты обладают важными практическими преимуществами: использованием стандартных электродвигателей, плавностью управления и снижением механических и пусковых нагрузок.

Перспективным направлением развития гидромуфт является совершенствование их проточной части, поскольку её геометрия определяет вид гидродинамических и энергетических характеристик. Одним из подходов к расширению функциональности является исследование геометрических модификаций — подрезки лопаток насосного и турбинного колеса, изменения угловой установки и их сочетаний (рис.1, а). Предполагается, что такие изменения могут влиять на вид контура циркуляции в межлопаточном канале и потенциал регулирования моментной характеристики (рис.1, б), что открывает возможность расширения номенклатурного поля в рамках одного типоразмера.

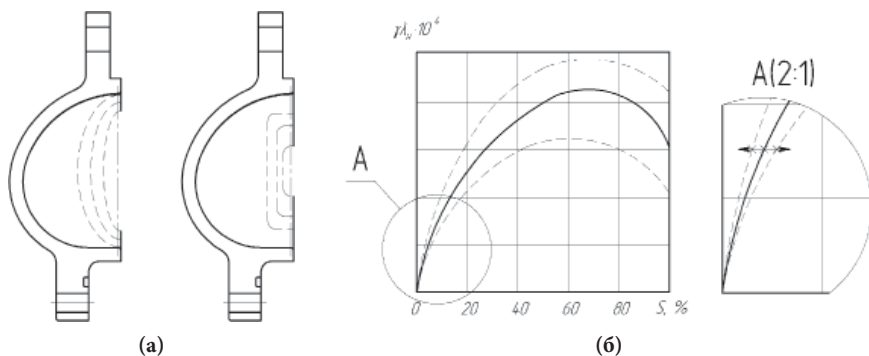


Рис. 1. Варианты формы и степени подрезки (1, а) и теоретическая безразмерная моментная характеристика (1, б)

В работе планируется проведение численных исследований на основе трёхмерного CFD-моделирования для оценки течения в полостях гидромуфты при различных вариантах профилировки. Это позволит анализировать распределения скоростей, давления и влияние на моментную характеристику для сравнения модификаций.

*И.А. Бушуйкин, Е.А. Потапов, студенты; А.В. Филатов, асп.;
рук. А.К. Лямасов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ОСИ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В ходе разработки свободно-поточной гидротурбины была разработана математическая модель для расчета треугольников скоростей, который показал, что омываемая площадь увеличивается с ростом угла наклона [1].

С помощью модели была лопастная система и проведено гидродинамическое моделирование (CFD) на основе метода конечных элементов [2]. Структура моделирования включает:

- оптимизацию геометрии меридианной проекции с лопастной решеткой;
- определение геометрических параметров лопастей при различных углах атаки потока;
- оптимизацию лопастной решётки, поворот которой способен поддерживать эффективную работу гидроагрегата в оптимуме.

В результате была получена зависимость мощности на валу гидроагрегата от угла наклона рабочего колеса (рис. 1), подтверждающая гипотезу об увеличении мощности посредством увеличения активной площади. Наибольший рост мощности наблюдается при малых положительных углах наклона вверх, при этом значительный наклон вниз приводит к резкому увеличению нагрузок на несущую конструкцию, что делает такой режим нецелесообразным без дополнительного усиления опор.

Работа выполнена в рамках проекта «Свободнопоточная гидротурбина с неколлинеарной направлению потока осью вращения» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

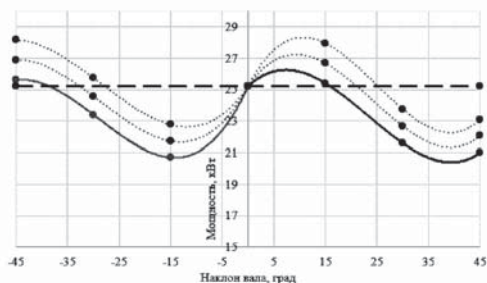


Рис. 1. Зависимость мощности от наклона вала ГТ

Литература

1. **И.А. Бушуйкин, Е.А. Потапов, А.В. Филатов, А.К. Лямасов.** Свободнопоточная гидротурбина с неколлинеарной направлению потока осью вращения / Технологии будущего : Сборник трудов X открытой Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием, Москва, 19–23 мая 2025 года. — Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2025. — С. 96–113. — EDN FLJAFK.
2. **Zhou, Weidong & Zhao, Zhimei & T, Lee & Winoto, S..** (2003). Investigation of Flow Through Centrifugal Pump Impellers Using Computational Fluid Dynamics. International Journal of Rotating Machinery. 9. 10.1155/S1023621X0300006X.

Направление XIII

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

**Special issues of the electric power
industry**

Руководитель направления:

Доцент кафедры

электроэнергетических систем

к.т.н., доцент

Насыров Ринат Ришатович

Секция 62

ПРОМЫШЛЕННЫЙ И МЕДИА ДИЗАЙН

Industrial and media design

Председатель секции:

к.ф.н., доцент Панкратова Александра Владимировна

Секретарь секции: Чахеева Екатерина Ивановна

*К.Н. Беженарь, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»*

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ДИЗАЙНА СМАРТФОНОВ

Современный смартфон это не просто устройство для установки связи, а отражение технологического прогресса и философия бренда. С каждым поколением инженеры и дизайнеры ищут баланс между функциональностью, эргономикой, эстетикой и смыслом.

В ранних телефонах дизайн не преобладал, гаджет выполнял базовые функции: связь и набор текста. Примером может служить первый телефон Motorola. Постепенно на развитие дизайна в телефонах всё сильнее начинает влиять рынок. Потребителей всё меньше интересуют внутренние характеристики устройства — внимание смещается к внешнему облику. Вследствие этого появляются изящные и интересные формы — раскладушки, слайдеры, среди которых особенно выделялись модели Nokia. Очередным прорывом на рынке стала миниатюризация, благодаря которой постепенно телефоны становились эргономичнее. Устройством, ставшее предпосылкой к созданию первого сенсорного телефона, стал Ericsson R380 с сенсорным экраном и стилусом. В 2007 г. Стив Джобс презентует первый сенсорный телефон — iPhone, который стал символом новой эры: единственный сенсорный экран, отсутствие физических кнопок и минималистичный интерфейс задали стандарт на годы вперёд и внедрили пользователей в медиасреду. Позже дизайн свёлся единому архетипу: стеклянный прямоугольник с металлической рамкой и минимум физических кнопок. Производители боролись за безрамочность, увеличивая диагональ дисплея. В этот период дизайн подчинялся не уникальности, а технологичным трендам, отчего устройства стали более лаконичными и идентичными. Когда возможности минимизации рамок исчерпались, точка обзора сменилась на заднюю панель смартфона, крупные, сложные по форме камеры стали новым визуальным акцентом. Параллельно с этим производители также экспериментируют с материалами панели: стекло (матовое), алюминий, титан, кожа и др.

Сегодня дизайн современных смартфонов возвращается к идее трансформации формы. На рынке появляются складные смартфоны, способные превращаться в планшеты. При этом усиливается интерес к созданию философии бренда, например, Fairphone — минимализм и сохранность окружающей среды, или Nothing Phone, отличающийся необычным, но при этом минималистичным дизайном.

Эволюция дизайна смартфонов прошла путь от функциональности к самовыражению. Современный смартфон сочетает технологии, удобство и индивидуальность, становясь не просто гаджетом, а частью стиля и культуры человека.

*М.Е. Дмитриева, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ»)*

ПОИСК НОВЫХ ВЕЩЕЙ И ФУНКЦИЙ В СОВРЕМЕННОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

Современный промышленный дизайн постоянно находится в движении, активно ищет и внедряет инновационные решения, которые позволяют повысить качество жизни, сделать повседневную деятельность более комфортной и одновременно учитывать требования экологической ответственности. В условиях стремительных технологических и социальных изменений дизайнеры и производители разрабатывают новые идеи и функции, расширяя границы привычных предметов и создавая совершенно новые продукты.

Одним из наиболее ярких и заметных трендов современного промышленного дизайна являются «умные» бытовые приборы, объединяющие привычную функциональность с возможностями современных информационных технологий. Например, холодильники с сенсорными дисплеями, встроенными камерами и подключением к интернету позволяют контролировать содержимое в режиме реального времени через смартфон и автоматически заказывать продукты, что значительно облегчает бытовые задачи и делает технику более умной и адаптируемой. В то же время все больше развивается концепция модульности предметов: производители создают мебель, электронику и другие устройства, которые легко соединять или изменять в зависимости от ситуации, что особенно актуально в условиях ограниченного городского пространства и способствует созданию экологических решений.

Иногда производители пытаются объединить несовместимые функции или технологии в одном продукте, и такие эксперименты не всегда оказываются успешными. В некоторых случаях это приводит к ухудшению работы устройства, снижению его надежности или усложнению процесса его использования. Поэтому внедрение инноваций требует аккуратного балансирования и тщательного тестирования, чтобы новые функции действительно приносили пользу, а не создавали дополнительные трудности для пользователя.

В целом, современный промышленный дизайн, это динамичное и постоянно развивающееся пространство, где технологические инновации становятся неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. В результате появляются продукты, максимально отвечающие современным требованиям к комфорту, функциональности и экологической ответственности, постоянно расширяя границы возможностей индустрии.

*В.А. Чернышова, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МЕДИАДИЗАЙНЕ

Искусственный интеллект (ИИ) сильно изменил медиадизайн в наше время, помогая автоматизировать рутину и ускоряя визуализацию идей. Он позволяет экономить время и ресурсы в работе и позволяет дизайнерам больше сосредоточиться на креативных идеях, генерируя множество вариантов для вдохновения. Однако чрезмерное использование ИИ приводит к шаблонности, потере оригинальности, рискам нарушения авторских прав и снижению доверия у аудитории.

Преимущества искусственного интеллекта очевидны: повышение эффективности, наглядные примеры идей, быстрота ответов, что позволяет улучшить коммуникацию с заказчиками и не только. Передавая рутинные задачи технике, дизайнеры могут больше сил тратить на создание инноваций, больше уделять времени анализу трендов. Это особенно ценно для малого бизнеса, где скорость и небольшие затраты дают преимущество в конкуренции.

Тем не менее, негативные последствия нельзя игнорировать. ИИ обучается на уже существующих работах, что рождает однообразный контент без души. Аудитория отвергает такой дизайн, а копирование стилей авторов приводит к судебным искам.

Пример — новогодняя реклама Coca-Cola в 2016 и 2024 году. Ролик выглядит живым благодаря живым актерам, режиссерам, передавшим теплую и зимнюю атмосферу, а в 2024 году ИИ-версия с явными дефектами, искажениями подверглась жесткой критике из-за ее бездушности. Аналогично малые компании, экономя ресурсы на дизайнеров, прибегают к помощи искусственного интеллекта, но такое решение компании приводят больше к убыткам. Компании теряют клиентскую лояльность из-за отсутствия уникальности. Стиль Хаяо Миядзаки и Studio Ghibli очень часто можно заметить в работах ИИ, что приводит к нарушению авторских прав и вызывает общественный резонанс.

Внедрение искусственного интеллекта в дизайн открывает множество возможностей, но требует контроля и нахождения баланса, при котором сохраняется творческая индивидуальность и быстрое решение задач.

*А.Д. Кондаков, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШРИФТА В СОВРЕМЕННОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

Шрифт в дизайне является важным элементом бренда — это не просто текст, это инструмент коммуникации между продуктом и потребителем.

Однако, в современном дизайне, в угоду тренда минимализма, шрифт в промышленном дизайне встречается все реже, а если он есть, то шрифт максимально незаметным, чтобы продукт выглядел более строго и сдержано. Это приводит к тому, что слишком мелкий или чрезмерно тонкий шрифт может быть нечитабельным. Также дизайнеры иногда выбирают трендовые, но плохо читаемые шрифты, чтобы продукт выглядит современно, игнорируя при этом основную функцию дизайна — передачу информации. Ключевой проблемой является использование шрифта с недостаточным контрастом к фону, что делает текст нечитаемым, особенно при плохом освещении, бликах или для людей с плохим зрением. А иногда и вовсе полностью отказываются от использования шрифта и заменяют его символами, логотипами. Яркий пример тому — новый macbook и imac: если раньше под экраном можно было увидеть название модели, а на тыльной стороне увидеть маркировку с серийным номером, то с 2022 года, кроме логотипа яблока, ничего нет.

Таким образом, современные дизайнеры делают ставку на внешнюю эстетику и красоту продукта, чтобы он выглядел более сдержано, строго, без лишнего информационного мусора. Шрифтовые композиции используются только для того, чтобы немного подчеркнуть философию бренда и больше не являются основным источником информации и коммуникации в промышленном дизайне.

*К.Д. Потапова, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»*

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ДИЗАЙНА ПРИЛОЖЕНИЙ

Современный дизайн мобильных приложений формируется под влиянием технологических возможностей, привычек аудитории, а также актуальности для потребителей. Его ключевая черта — стремление создать максимально понятный, интуитивный, простой цифровой продукт.

Важным фактором дизайна является тенденция на минимализм. Простые закругленные плавные формы, меньше вкладок — больше функций. Чем проще, тем лучше. Однако интерфейс зависит от моды. Например, раньше в моде были квадратные, острые кнопки.

Еще одна возможностей современного дизайна приложений — «Dark mode». Темный режим приложения позволяет работать ночью, снижая нагрузку на глаза. На экранах OLED-матриц (большинство современных смартфонов) экономит заряд батареи. Дает контроль над средой, повышает комфорт.

Цветовая палитра. Для создания дизайна приложений используют правило «60-30-10». Базовый цвет (60%): задает общее настроение. Часто это нейтральный — белый или темно-серый/черный (в темном режиме) — это фон. Второстепенный цвет (30%): цвет для акцентов. Им окрашивают крупные, но не главные элементы. Акцентный цвет (10%): самый яркий, контрастный цвет. Используется для главных действий, состояний и важных уведомлений.

Эргономика для управление рукой. Существует метод «светофора» — схема, показывающая зеленые, желтые, красные зоны куда человек может достать пальцем. Это позволяет сделать интерфейс более удобным для пользователя. Например, в приложении Spotify все функции находятся в нижней части экрана, что позволяет легко достать до них.

Функции офлайн-работы. Одна из важных задач дизайнера составить интерфейс приложений, позволяющий работать без сети. Это повышает доверие пользователя и привлекает других клиентов. В качестве примера приведем приложение «Shazam» для прослушивания музыки офлайн и приложение «2GIS» — скаченные карты города.

Таким образом, современный дизайн приложений совмещает в себе эргономику и визуальные тренды. Хороший дизайн предугадывает проблемы пользователя, формирует доверие, комфорт.

Я.Г. Скурская, студ. ;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)

ЦВЕТ В МЕДИАСРЕДЕ

Для медиадизайнеров важно не только владеть цветовой теорией, но и понимать, как цвет помогает формировать визуальную идентичность, усиливать сюжет и изменять внимание людей в самых разных медиасредах — от кино и анимации до социальных сетей и интерфейсов.

Цвет всегда вызывает определённые эмоции и ассоциации. То есть, красный — энергия, скорость, страсть, тревога; жёлтый — динамика, оптимизм, мудрость, надежда; розовый — любовь, здоровье, мягкость и др. Примером является бренд «Coca-Cola», красный в нём создаёт ощущение энергии и праздника. Компания «Тиффани» создала уникальный оттенок бирюзового — «Tiffany Blue», передающий чувство роскоши и свежести. Даже логотип «МЭИ», где буква «Э» красная, символизирует энергию. Значительным аспектом является использование цветковых моделей, которое помогает дизайнерам создавать правильное стабильное отображение цвета на разных устройствах. Цифровой медиадизайн опирается на систему RGB — это основа всего экрана, но также значимыми являются HSV (работа с тоном, сочетаниями, яркостью) и CIELAB (приближение к человеческому восприятию). Также немаловажным инструментом служит гармония цвета. Цветовые сочетания — основа визуальной привлекательности. Существует три классические схемы: аналогичная (соседние цвета на круге), комплементарная (контрастные противоположности) и триада (три оттенка, через равные промежутки). Особенно ярко выразительная цветовая роль проявляется в кино. Например, в сериале «Уэнсдей» используется контраст белого, черного и фиолетового для создания готической атмосферы и подчеркивания характера героини. В «Звездных войнах» красный меч и черная одежда — символ зла, а голубой и белый — добро. В «Аватаре» голубые и зеленые оттенки создают гармонию с природой, а неоновые фантастичность. В анимации цветовая палитра выступает первичным выразительным средством. К примеру, «Головоломка» напрямую связывает эмоции с цветами. В «Холодном сердце» синие оттенки Эльзы противопоставлены теплым цветам Анны, что помогает нам понять характеры и состояния героев, а также их роль в мультфильме. В «Суперсемейке» насыщенные цвета супергеройской жизни резко контрастируют с серой палитрой обычных будней, визуально разделяя два мира. В цифровых медиа цвет служит инструментом привлечения внимания, формирования и значимости бренда. Так, например, приложение Spotify, благодаря ярко-зеленому оттенку, выделяется среди конкурентов. TikTok сочетает черный с неоном — эстетика молодёжности, творчества и веселья. Netflix с помощью черного и красного создает атмосферу кинотеатра.

К.С. Тропина, студ.; рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»

ОБРАЗ ЧЕЛОВЕКА В МЕДИАДИЗАЙНЕ

Медиадизайн представляет собой среду коммуникации медиаплатформ и человека. В современном медиадизайне наиболее популярен в использовании образ человека. Рассмотрим исторический контекст. В рекламе, упаковках и медиа-наборах начала-середины XX в. находили широкое применение стандартизированные «идеальные» образы людей с «правильными» лицами и телами, зачастую выстроенными за счет гендерных и социальных стереотипов того времени. С 1950-х, в связи с развитием телевидения и массовых медиа, рекламная индустрия строила образ «идеального» человека, исходя не из реального разнообразия тел, а из коммерческих и культурных стандартов. После этих социальных стандартов были введены новые, прямо противоположные предыдущим — инклюзивные. В медиадизайне стали фигурировать люди разных телосложений, этносов, возрастов, групп здоровья. Первым примером послужил бренд Dove «Campaign for Real Beauty» в 2004 году, который показал реальный вид женщин разных типов без идеализации. Затем с 2010-х к этой тенденции обратились такие компании как Nike, Arie, H&M, Apple. А с 2019 и модный дом Gucci Beauty. В стандартах инклюзивности можно выделить как плюс, что люди с особенностями, которые им нельзя изменить, чувствуют себя увереннее, так же, как и люди с внешностью, далекой от конвенционального понимания красоты. Ко всему прочему это делает хорошую выручку компаниям и брендам. Но действительно ли настолько положителен и гуманистичен данный подход? С ростом популярности инклюзивности, многие бренды используют разнообразие не как ценность, а как способ увеличить продажи. Явление порождает навязчивость и поверхностность визуальных решений. Дизайнеры начинают включать персонажей ради галочки как, например, в ремейке «Русалочки» 2022 года от Disney. Обязательность включения различных инклюзивных персонажей вызывает давление и профессиональный стресс у дизайнеров. Зачастую данный подход отвлекает от основной идеи проекта и превращается в некую «повестку». Таким образом, заложенные смыслы отходят на вторые позиции, на первой — манипуляция через моральный авторитет. Данный посыл тяжело оспорить, ведь если выступаешь против концепции, могут обвинить в угнетении прав людей. Из вышеописанного следует вывод, что идея инклюзивной подачи человека в медиадизайне, на самом деле создана коммерческой маркетинговой стратегией, и включает в себя манипуляции аудиторией и часто лишает свободы созидательную творческую деятельность.

Я.А. Чернова, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ»)

ПРЕОБЛАДАЮЩИЕ ФОРМЫ В СОВРЕМЕННОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

Форма является одним из важных элементов в промышленном дизайне. Она определяет не только внешний вид, но и эргономические и функциональные качества изделия. В современных условиях, когда развиваются цифровые технологии и возрастает внимание к потребностям пользователя, формообразование играет большую роль.

Геометрические фигуры являются основой для промышленного дизайна. Они удобны в эксплуатации и производстве благодаря своей простоте и четкости линий. Часто такие формы объединяются с принципами минимализма: простыми объемами и лаконичными линиями, что делает изделия визуально аккуратными. Примерами использования геометрических форм являются смартфоны и телевизоры, в конструкции которых преобладают прямые линии и простые объемы.

Органические формы повторяют природу. Они характеризуются плавностью линий и отсутствием острых углов. Такие формы создают ощущение гармонии и комфорта. Они используются для повышения комфорта взаимодействия человека с предметом, способствуют улучшению аэродинамических свойств и улучшают эргономические характеристики изделий.

Параметрические формы в промышленном дизайне создаются с помощью алгоритмов, что позволяет воплощать сложные конструкции. Такой подход используют в создании мебели и 3D-печатных изделий, где важны высокая вариативность решений и нестандартная геометрия.

Модульные конструкции основаны на принципе повторяемости элементов, что позволяет трансформировать изделие, комбинируя одинаковые элементы различными способами. Такие конструкции обеспечивают экономичность и универсальность. К данному типу относятся модульная мебель, например шкафы-купе, а также складные самокаты и велосипеды.

Обобщив сказанное, можно сделать вывод, что преобладающие формы в современном промышленном дизайне формируются под влиянием функциональных, эстетических и эргономических факторов. Сочетание геометрических, органических, параметрических и модульных форм позволяет создавать технологичные, удобные и ориентированные на пользователя изделия. В отличие от ранее преобладавших строгих и статичных форм, современные промышленные изделия отличаются простотой и большей пластичностью.

В.Е. Виноградова, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН И РОБОТОТЕХНИКА

Перед промышленным дизайном в робототехнике стоит важная задача — совместить функциональность, эстетичность, удобное использование и адаптацию к реальным условиям эксплуатации. Эти принципы позволяют создавать роботов, которые эффективно взаимодействуют с человеком как в бытовой, так и в производственной среде. Использование робота в контакте с людьми требует качественного дизайна. Устройство должно вызывать дружелюбные эмоции, чтобы успешно интегрироваться в повседневную жизнь. Например, роботы часто имеют бионические формы, небольшие размеры, и напоминают домашних питомцев. Это помогает человеку чувствовать себя комфортно рядом с таким устройством.

Такой подход формирует доверие и делает роботизированные устройства интуитивно понятными. В качестве примера можно привести робот-пылесос, который стал неотъемлемой частью быта. Его популярность объясняется удачным сочетанием компактной формы и простоты интерфейса.

При выборе цвета дизайнеры предпочитают приглушенные оттенки, в основном это вариации серого, белый и черный. Нейтральные цвета успокаивают, уменьшают визуальный шум, а плавные контуры воспринимаются как менее агрессивные.

Роль промышленного дизайнера в робототехнике заключается в том, чтобы быть проводником между инженерами и пользователями. Часто ожидания и продукт не совпадают, поэтому для создания понятного и удобного робота необходимо учитывать потребности пользователя, проводить тестирования и анализировать обратную связь.

Социальные барьеры и формирование доверия — ещё одна важная задача дизайнера. Из-за отсутствия необходимых знаний и недоверия работников к роботам, происходят трудности при внедрении роботизированных систем на предприятиях. Дизайн помогает снизить напряжение. Примером успешной интеграции робота в повседневную жизнь является робот-доставщик, сделанный компанией «Яндекс». Дизайнеры справились с созданием дружелюбного образа и успешной коммуникацией. Робот вызывает у людей доверие и положительные эмоции.

Таким образом, перед промышленными дизайнерами в робототехнике стоит важная социальная ответственность в создании синтеза комфорта, эстетики, успешного взаимодействия с людьми и культурной адаптации новых технологий.

Д.А. Липунов, студ.; рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

Искусственный интеллект всё чаще применяется в сфере промышленного дизайна. Он открывает новые возможности для создания инновационных продуктов, позволяет автоматизировать рутинные задачи, такие как генерация идей, моделирование, анализ данных.

Создание концепта — важный этап, на котором формируется визуальный образ будущего продукта [1]. Искусственный интеллект создаёт множество вариантов дизайна на основе заданных параметров. Ранее требовалось немало времени и определённых навыков для создания большого количества эскизов.

Также искусственный интеллект обеспечивают реалистичную визуализацию, что значительно сокращает временные затраты. Хотя современные нейросети пока не способны создавать полностью готовые 3д-модели, но они могут предложить множество вариантов, которые затем могут быть доработаны дизайнером [1].

Ещё один из способов применения искусственного интеллекта — анализ данных. Алгоритмы анализируют огромные объёмы данных, помогая найти оптимальные решения по эргономике, материалам и т.д. Это может помочь в создании продукта, максимально соответствующие потребностям целевой аудитории.

Таким образом, использование искусственного интеллекта значительно оптимизирует многие задачи в производстве, что значительно сокращает временные затраты. Однако, искусственный интеллект — это вспомогательный инструмент, и его эффективность зависит от профессиональных навыков дизайнера.

Литература

1. Жулева У.К., Парфенова Е.В. Внедрение искусственного интеллекта на различных этапах разработки проекта в промышленном дизайне // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 11-2 (98), 2024. С. 173–177.

А.Г. Гончарова, студ.;
рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО МЕДИАДИЗАЙНА

Современный медиадизайн переживает не просто трансформацию — он сталкивается с системным кризисом, вызванным диктатом массового потребления. Бренды целенаправленно обезличивают свои визуальные продукты, стремясь сделать их как можно более нейтральными и, следовательно, максимально продаваемыми. Это уже не тенденция, а стратегия: чем меньше индивидуальности, тем выше вероятность, что продукт впишется в любой контекст и понравится «среднему» потребителю.

Именно поэтому визуальная среда стремительно теряет разнообразие. Современные рекламные постеры глобальных компаний всё чаще строятся по одному шаблону: чрезмерно «чистые» композиции, минималистичные объекты, приглушённые цвета, отсутствие любого визуального риска. Такие постеры перестают быть медиа-высказыванием — они превращаются в безликие носители товара, рассчитанные на максимально быстрое распознавание и минимальную эмоциональную вовлечённость. Аналогичная ситуация наблюдается и в дизайне обложек модных журналов: журналы, некогда формировавшие визуальные тренды, теперь тиражируют одни и те же решения — крупный текст, нейтральный фон и стерильная, идеализированная модель, лишённая индивидуального контекста.

Этому способствует и широкое использование искусственного интеллекта, который обучается на уже усреднённых визуальных данных. Генеративные системы не создают визуальную новизну — они воспроизводят уже существующие настройки, паттерны. Как результат, бренды получают быстрый, дешёвый и предсказуемый контент, который ещё больше усиливает обезличенность медиапространства.

Проводя черту, выходит, что проблема современного медиадизайна заключается не в эстетическом выборе минимализма, а в сознательной стратегии подавления индивидуальности ради коммерческой универсальности. Если отрасль не начнёт сопротивляться этому процессу, визуальная культура рискует превратиться в непрерывный поток взаимозаменяемых изображений, лишённых художественной ценности и культурной значимости.

Т.А. Лесной, студ.; рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»

ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ В СОВРЕМЕННОЙ МОДНОЙ ОДЕЖДЕ

В наши дни практически каждый человек хочет выглядеть выделяющимся на фоне остальных. Многие самовыражаются благодаря своему чувству стиля. В современном мире существует огромное количество брендов от стандартных форм одежды до неординарных.

В данной статье на примере нескольких брендов рассмотрим основные формы современной модной одежды.

Первый бренд «post post scriptum» или сокращенно «p.p.s». Бренд производит одежду оверсайз унисекс, но в основном его покупают женщины, потому что мужчины не привыкли носить оверсайз вещи. В коллекции p.p.s. преобладает разнообразие классического официального образа. Оверсайз пиджаки, рубашки и брюки, которые в основном предпочитают покупать люди в возрасте от 13 до 35 лет.

Второй бренд — «F | ABLE» знаменит своими оверсайз пуховиками. Разнообразие проявляется в цвете и форме, а также воротниках: от коротких до длинных. Также бренд производит официальную одежду в ярких насыщенных тонах. Подобное присутствует в малом количестве брендов из-за того, что пиджаки и брюки покупатели привыкли видеть в классических черных и белых цветах. Помимо этого F | ABLE производит длинные оверсайз плащи. Такое редко кто делает для мужских коллекций, чтобы не сковывать движения в руках и длина изделия была почти в пол. В основном в других брендах такое делают только для женских коллекций.

Третий бренд — «CROQUIS» производит неординарные и оверсайз и одновременно не такие длинные вещи. Классические вещи у них бывают разных видов и в то же время напоминают спортивный стиль, благодаря укороченной длине, широким рукавам и плечам. Также этот бренд использует для пошива изделий более качественные натуральные ткани, благодаря этому у потребителей нет раздражения на теле.

Таким образом, можно сделать вывод, что современные бренды, каждый по-своему, пытаются выделиться среди других на рынке, чтобы заинтересовать потребителя. Практичность и удобство играют важную роль в создании одежды, не исключая разнообразие формы и длины. Благодаря этому мир моды не стоит на месте и постоянно развивает основные образы.

К.К. Ужуева, студ.; рук. А.В. Панкратова, к.ф.н., доц. (НИУ МЭИ)»

ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦВЕТА В СОВРЕМЕННОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

Цвет в современном промышленном дизайне играет значительную роль в привлечении внимания покупателей к товарам. Ежегодно мы можем наблюдать за тем, как появляются новые тренды палитры цветов, тем самым подстраиваясь под моду, настроение общества и востребованность.

Под каждым цветом таится его ассоциация, восприимчивость различных народов и даже физиологические изменения. В первую очередь, важность цвета в промышленном дизайне заключается не в эстетическом удовлетворении и вкусе, а в том, как это будет влиять на психологию людей и трудоспособность. Все мы привыкли, что синий, допустим, хорошо ассоциируется у нас с технологиями, доверием, в то время, как желтый может отталкивать и обозначать как нечто небезопасное. Также известный крупный производитель автомобилей премиального класса «Мерседес», отдает должное внимание темным оттенкам, что может говорить об авторитетности, элегантности и классике компании. Не во всех сферах цвета могут восприниматься одинаково, поэтому важно грамотно подбирать оттенки и не использовать слишком большое количество цвета на одном товаре: это может вызвать хаос в глазах у покупателя. Невозможно выделить однозначную моду на определенный цвет в современном мире, но можно заметить как общество стало больше предпочитать цвета, приближенные к природным оттенкам, что может также символизировать необходимость спокойствия и стабильности в глазах современных людей. В нынешнее время сложно назвать цвет второсортным, ведь он выполняет также функциональную роль в устройствах. Почти во всех гаджетах определенные цвета указывают на режим работы, обозначают важные элементы управления и направляют внимание пользователя.

Таким образом, правильно подобранный цвет в промышленном дизайне может хорошо окупить товар, делая его более примечательным и востребованным, тем самым повысить узнаваемость бренда. Современный промышленный дизайн сочетает креативный подход к выбору цветовой палитры и сочетаемость функциональности, места применения и вкуса людей.

Секция 63
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА В ВОЕННОМ ДЕЛЕ
Electric power in the military

Председатель секции: к.в.н., доцент Ивахненко Вадим Иванович

Секретарь секции: Силаев Дмитрий Александрович

*А.Г. Лукманов, студ.; П.А. Крежановский (НИУ «МЭИ»);
А.Н. Сахар, курс.;
рук. В.И. Рубинов, к.т.н., доц. (ВУНЦ ВВС «ВВА»)*

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧАСТЕЙ ВВС НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Эффективность решения поставленных перед авиационными частями боевых задач в основном определяется уровнем инженерно-авиационного обеспечения (ИАО). Опыт эксплуатации современной авиационной техники (АТ) и выполнение боевых задач Воздушно-космическими силами за пределами Российской Федерации без снижения требований к уровню боевой готовности показал, что выполнение мероприятий ИАО на требуемом уровне является сложной комплексной задачей. Следовательно, требуемые значения показателей боевой готовности будут достигаться при постоянном обеспечении высокой исправности АТ и сокращении времени, необходимого для её подготовки к выполнению боевых задач [1]. Поэтому, для поддержания авиационных частей на требуемом уровне боевой готовности необходимо решить следующие задачи:

- совершенствование организационно-штатной структуры авиационных частей с целью достижения оптимального соотношения численности инженерно-технического состава (ИТС) с количеством АТ;
- разработка специального программного обеспечения для управления специалистами ИТС при выполнении работ на АТ;
- создание оптимальной системы обеспечения запасных частей и материалов, предполагается реализация поэтапного перехода на региональную систему обеспечения материальными средствами;
- для восстановления системы войскового ремонта нужно провести техническое переоснащение ТЭЧ авиационного полка для решения новых задач войскового ремонта, позволяющих снизить потребность в заводском ремонте; целесообразно создание региональных баз войскового ремонта.

Таким образом, для обеспечения боевой готовности авиационной части и требуемого уровня исправности АТ необходимо постоянно совершенствовать процесс технической эксплуатации и активизировать разработку и внедрение прогрессивных стратегий, методов и ресурсосберегающих технологий технического обслуживания, ремонта, транспортирования и хранения АТ. При этом особое внимание следует уделить вопросам практической реализации методов эксплуатации, ремонта и хранения АТ «по состоянию».

Литература

1. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения Государственной Авиации (книга 1). М.: 2005, 296 с.

*А.П. Рыльский, студ.; рук. К.А. Селютин (НИУ «МЭИ»);
А.Н. Сахар, курсант;
рук. В.И. Рубинов, к.т.н., доц. (ВУНЦ ВВС «ВВА»)*

ПРОЦЕДУРА АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ВИДОВ, ПОСЛЕДСТВИЙ И КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

К одному из основных видов анализа надежности можно отнести анализ видов последствий отказов, количественного анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО). Согласно [1], АВПКО представляет собой сочетание качественного АВПО изделия авиационной техники (АТ) с количественными оценками критичности видов отказов. При этом каждый вид отказа должен быть ранжирован с учетом двух составляющих критичности — вероятности и тяжести последствий отказа. Определение параметров критичности необходимо для выработки корректирующих действий разработчика и для проведения мероприятий, связанных с доработкой конструкции изделия АТ с целью повышения его надёжности. При проведении АВПКО устанавливается требуемый уровень декомпозиции, с которого начинается анализ и идентифицируются все элементы выбранного уровня. Описываются все виды отказов элементов и определяются их последствия на данном и вышестоящих уровнях и, в зависимости от тяжести последствий отказов, им назначаются категории тяжести последствий отказов (КТПО). Если рассматриваемый отказ может привести к нескольким последствиям разной тяжести, то ему назначается КТПО наиболее тяжелого последствия. Эффективное проведение АВПКО изделия АТ требует автоматизации этого процесса. При этом необходимо создание специального математического и информационного обеспечения, а также разработка соответствующих алгоритмов обработки данных. Для создания информационного обеспечения автоматизированного проведения АВПКО необходимо использовать интегрированный подход, который объединяет в себя методологию функционального моделирования процессов в системе (IDEF0) и методологию информационного моделирования (IDEF1X). Разработанные алгоритмы обработки данных позволят выявить и получить список элементов изделия АТ, отказы которых могут повлиять на работоспособность и поддерживаемость изделия АТ в целом, и для которых надо будет провести расчет периодичности выполнения работ по их техническому обслуживанию и ремонту. Таким образом, разработка программно-технического решения, позволит повысить его эффективность и снизить затраты на его проведение.

Литература

1. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов.

А.Н. Русин, студ.; рук. И.В. Сисигин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННОГО КОММУТАТОРА СВЧ СИГНАЛОВ

Одной из ключевых задач радиолокации является пеленгация — определение точного направления (азимута и угла места) на источник радиоизлучения. Это имеет критическое значение в таких областях, как навигация, радиоэлектронная борьба (РЭБ), а также гражданский мониторинг радиочастотного спектра для выявления неавторизованных передатчиков или источников помех.

В настоящий момент актуальна задача совершенствования систем пеленгации. Для решения данной задачи в Научном центре радиолокационных систем НИУ «МЭИ» был изготовлен макет двухканального пеленгатора на базе модуля исследования радиотехнических систем «МИРТС», разработанного в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова. Чтобы обеспечить подключение множества различных антенных систем к входным каналам модуля был разработан антенный коммутатор СВЧ сигналов.

Для корректного взаимодействия пеленгатора и коммутатора, особенно при анализе сложных входных сигналов, требуется учёт задержек при передаче и обработке данных. На начальном этапе разработки эти временные задержки не были учтены, что приводило к рассинхронизации данных и невозможности корректной обработки.

Автор разработал и реализовал лабораторный стенд, на котором провёл детальные исследования взаимодействия компонентов коммутатора, измерил фактические временные задержки и на основе полученных результатов внес необходимые программные доработки, обеспечив согласованную работу (синхронизацию) всего комплекса.

Внедрённые изменения не только решили проблему синхронизации, но и расширили реальные возможности комплекса, позволив подключать многокомпонентные антенные системы, а также получать и обрабатывать увеличенный объём информации в режиме, близком к реальному времени.

Литература

1. **МОДУЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ «МИРТС»**
Руководство по эксплуатации ЯРЛЕ.464948.001 РЭ
2. **МОДУЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ «МИРТС»**
Руководство пользователя по работе с тестовым ПО ЯРЛЕ.464948.001 И1
3. **Архангельский А.Я.** Программирование в C++ Builder 6. М.: Бинум-Пресс, 2003.

И.С. Солминов, студ.; рук. И.В. Сисигин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ С КАНАЛОМ ПОВЫШЕННОЙ СКРЫТНОСТИ

Современные реалии ведения боевых действий крайне требовательны к системам связи. Устойчивая и скрытная связь является критически важным компонентом системы управления. Широкополосные каналы спутниковой связи, используемые для передачи больших объемов данных, уязвимы для средств радиоэлектронной разведки и подавления противника. В связи с этим актуальной задачей является разработка и исследование альтернативных способов связи, имеющих малую вероятность обнаружения средствами радиотехнической разведки противника.

Предлагается подход к созданию скрытного канала связи, основанного на использовании узконаправленных антенн и низкоэнергетических сигналов. Новизна заключается в комплексном программном обеспечении, которое обеспечивает:

- точное автоматическое наведение антенны на движущийся объект;
- минимизацию энергетического портрета излучения за счет сверхузкой диаграммы направленности, что сильно снижает вероятность перехвата сигнала;
- иомехоустойчивое кодирование, адаптированное для работы в условиях активных радиоэлектронных помех противника или пассивных помех на направлении передачи сигнала.

Разработан программный комплекс, являющийся цифровым двойником систем радиосвязи повышенной скрытности.

Разработанный программный комплекс может быть использован:

- для обучения специалистов в области защищенных систем связи;
- в качестве исследовательского стенда для отработки новых алгоритмов наведения и помехоустойчивого кодирования;
- для проверки программных и технических решений перед их развертыванием в перспективных наземных, морских и космических комплексах связи.

Литература

1. **Перова А.И., Харисова В.Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования.
2. **Тютякин А.В.** Основы эффективного и помехоустойчивого кодирования сообщений.

*П.Е. Григорьев, студ.; рук. Э.К. Рзаев (НИУ «МЭИ»);
Р.М. Устинов, курс.; рук. В.И. Рубинов, к.т.н., доц.
(ВУНЦ ВВС «ВВА»)*

МЕТОДИКА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ДОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Предлагаемая система поставок запасных частей (ЗЧ) является децентрализованной, ее ядром будет являться логистический центр сервисного обслуживания, на который возложены задачи приема заявок на ЗЧ, организация поиска и их доставка. Все участники логистического процесса поставок ЗЧ равноправны. Они самостоятельно определяют степень участия в поставках ЗЧ, кто какие ЗЧ предлагает, и кто доставляет. Задача поиска оптимальных вариантов доставки в предлагаемой системе поставок формально сводится к решению транспортной задачи линейного программирования (ЛП). Для того чтобы свести задачу распределения ЗЧ к решению задачи ЛП необходимо выполнить ряд шагов.

Во-первых, на основании полученных именных заявок определить множество складов, имеющих истребованные ЗЧ с использованием существующей иерархической структуры тыла [1] и на основании набора эвристических критериев. Во-вторых, для удовлетворения требования задачи ЛП, выполняется исключение из рассмотрения тех ЗЧ, которые не могут быть поставлены (например, нет на складах). По перечню данных ЗЧ осуществляется заказ на их ремонт, изготовление, подготавливаются в качестве предложений решения о доставке недостающих ЗЧ с авиационной техники-доноров. В-третьих, для вычисления значения целевой функции необходимо знать заранее стоимости возможных маршрутов доставки. Для получения их значений необходимо построить маршруты доставки ЗЧ со складов заказчиков. В-четвёртых, на основании полученных данных решение задачи ЛП будет осуществляться Симплекс методом. После нахождения варианта распределения ЗЧ выполняется проверка времени доставки ЗЧ. Если разброс во времени доставки больше времени замены агрегатов, то доставка ЗЧ приходящей первой меняется на более «медленный» маршрут.

Таким образом, применение предлагаемой методики поиска оптимальных вариантов доставки ЗЧ позволит получить их распределение, которое будет экономически выгодным и быстрым.

Литература

1. Руководство по обеспечению запасными частями авиационной техники, простаивающей в неисправном состоянии из-за их отсутствия. М.: 2004. 57 с.

А.А. Кормаков, студ.; рук. И.В. Сисигин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УНИВЕРСАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО СБРОСА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

Одна из самых быстроразвивающихся отраслей промышленности в современном мире это производство и эксплуатация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Имея достаточно высокие эксплуатационные характеристики БПЛА позволяют решать различные стандартные и специфические задачи. Одной из таких задач являются логистические задачи по доставке полезной нагрузки в сложных условиях. Это прежде всего транспортировка медикаментов, средств связи, экстренных грузов при чрезвычайных ситуациях. В военных целях — доставка и сброс средств поражения противника.

Существует большое количество вариантов компоновки беспилотных летательных аппаратов, форм и массы различных грузов. Поэтому, актуальной является задача разработки простого и надежного съемного устройства сброса, которое являлось бы универсальным, с точки зрения крепления к несущему аппарату и типу полезной нагрузки.

Для решения данной задачи в военном учебном центре НИУ «МЭИ» автором было разработано оригинальное универсальное устройство сброса полезной нагрузки КРАБ повышенной нагрузочной способности. Конструкция сброса спроектирована в программе твердотельного моделирования и изготовлена в Научном центре радиолокационных систем военно-инженерного институту НИУ «МЭИ» методом аддитивных технологий, которая обеспечила низкую стоимость производства и простоту сборки. Сброс КРАБ способен нести разнообразную нагрузку до 8 кг. и адаптирован к широкому кругу БПЛА квадрокоптерного типа.

Летные испытания на аэродроме «Волосово» МГАК ДОСААФ России подтвердили работоспособность, надежность и прочность механизма, а также практическую применимость в полевых условиях. Таким образом, устройство сброса полезной нагрузки может решать задачи логистики грузов посредством беспилотных летательных аппаратов в сложных условиях.

Литература

1. **М.С. Салимов, С.В. Астахов, Г.Р. Сайпулаев.** Основы компьютерного моделирования роботов. — М.:Издательство МЭИ, 2023.

*М.А. Вдовин, студ.; рук. Силаев Д.А. (НИУ «МЭИ»);
Р.М. Устинов, курс.; рук. В.И. Рубинов, к.т.н., доц.
(ВУНЦ ВВС «ВВА»)*

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ И ЕЁ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

В современных условиях требуется разработка концепции, а также обоснование принципов, методов и средств управления как организацией в целом, так и складом в частности. Внедрение современных компьютерных технологий позволяет решать данную задачу оптимизации процессов управления сложными комплексными системами с использованием математическим (вероятностных) моделей. Для решения этой задачи была разработана структура комплексной системы «эксплуатация — ремонт — поставка (склад)», которая позволяет [1]: — вывести систему стохастических дифференциальных уравнений, описывающих вероятностные моменты (математические ожидания и дисперсии переменных) в соответствии с разработанным графом задачи; — получить среднее значение коэффициента исправности в любой момент времени; — разработать и реализовать процедуру оптимизации параметров политики поставок.

Следует отметить, что интенсивности нелинейно зависят от математического ожидания количества объектов находящихся в соответствующих состояниях разработанного графа. Для линеаризации указанных интенсивностей применяется метод статистической линеаризации. Разработанная модель позволит спрогнозировать динамику изменений состояний объектов системы, т.е. количество исправных объектов на складе, объектов находящихся в эксплуатации, в различных видах ремонта и т.д. Для определения оптимальных параметров системы в качестве критерия эффективности её функционирования используется интегральное значение квадрата отклонения среднего значения коэффициента исправности от заданного. При этом задача оптимизации параметров системы будет состоять в минимизации выбранного критерия эффективности. Для решения этой задачи предлагается использовать метод градиентного спуска. Таким образом, предложенный подход к решению задачи моделирования и оптимизации динамических процессов в системе объектов многоразового использования отражает общий новый подход к моделированию логических систем и определению их оптимальных параметров.

Литература

1. **Шаламов А.С.** Интегрированная поддержка наукоёмкой продукции. Монография. М.: Университетская книга, 2008. 464 с.

Секция 64

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ДОНБАССА

Special issues of the Donbass electric power industry

Председатель секции:

*к.т.н., доцент Ткаченко Сергей Николаевич — заведующий кафедрой
«Электрические станции» ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»*

Секретарь секции:

*к.т.н. Гуляева Ирина Борисовна — доцент кафедры
«Электрические системы» ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»*

А.С. Крапивин, студ.; рук. С.В. Гридин, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Одним из приоритетных направлений снижения расхода энергоресурсов котельными регионами является повышение энергоэффективности за счет создания автономного источника энергоснабжения для покрытия собственных потребностей котельной в электроэнергии. В рамках этого предлагается рассмотреть внедрение когенерационных установок (КГУ), которые представляют собой комплекс с турбиной и присоединённым электрическим приводом.

На примере существующей паровой котельной с установленными паровыми котлами ДКВР-4-13 было проведено исследование по внедрению КГУ. Поскольку потребителю необходимо подавать 0,33 т/ч пара при действительном расходе пара 3,558 т/ч, решено пустить невостребованный пар на паротурбинную установку (ПТУ) S2E II 200–700 кВт производства «Technora» с электрическим асинхронным генератором «Сименс».

Технические параметры ПТУ приведены в таблице.

Технические параметры модульной конструкции паровой турбины с электрическим генератором

Электрическая мощность, кВт	200–700
Температура пара на входе, °С	130–420
Давление пара на входе, бар абс.	6,0–63,0
Температура пара на выходе, °С	105–280
Давление пара на выходе, бар абс.	0,5–14,0
Расход пара, т/ч	4,0–25,0
Напряжение, В/3 фазы	380
Частота, Гц	50

Исследование показало, что электроэнергия, выработанная собственной установкой, пойдет на производственные и собственные нужды котельной, что позволит снизить себестоимость тепловой энергии на 28,91 руб., капиталовложения в сумме 19946,038 тыс.руб. окупятся за 2,6 года, при этом экономический эффект составит 4573,642 тыс.руб. Таким образом, внедрение мероприятия позволит обеспечить надежное электроснабжение котельной и снизить расход электроэнергии из общей сети.

Литература

1. **Петрущенко, В.А., Васькин В.В.** Тепловые схемы мини-ТЭЦ на базе противоаварийных паровых турбин, применяемые в рабочих проектах / В.А. Петрущенко, В.В. Васькин // Новости теплоснабжения, № 8, 2004. — С. 22–26.

Д.В. Панасенко, студ.; рук. С.В. Деркачёв, к.т.н. (ДонНТУ, Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРЫВА СТЕРЖНЕЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором благодаря простоте своей конструкции и обслуживанию получили широкое применение в качестве электроприводов технологических установок. В процессе эксплуатации асинхронные электродвигатели испытывают значительные нагрузки из-за частых или тяжелых пусков, что снижает уровень их надежности и в дальнейшем может привести к их полному выходу из строя. Как показывает статистика [1, 2], 17% выхода из строя асинхронных электродвигателей связано с повреждениями обмотки короткозамкнутого ротора, среди которых обрыв стержней достигает порядка 80% от всех отказов.

В работе автором предложена математическая модель асинхронного электродвигателя, представленная в трехфазной системе координат для токов статора с учётом потерь в стали. В отличие от существующих моделей, она позволяет выполнять моделирование обрыва любого количества стержней в короткозамкнутой обмотке ротора, а также проводить анализ переходных процессов в обмотках статора в случае возникновения обрыва стержней ротора.

Предложенная математическая модель может быть использована для оценки эффективности существующих методов диагностирования состояния асинхронного электродвигателя, а также для разработки новых методов диагностики фактического состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя.

Литература

1. **Зюев А.М., Метельков В.П.** О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329. — № 7. — С. 96–103.
2. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей / Глазырин А.С., Полищук В.И., Тимошкин В.В. [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332, № 10. — С. 213–227.

*Н.С. Яцунский, студ.;
рук. И.И. Ларина, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

На строительство, эксплуатацию и реконструкцию энергетических объектов требуются значительные инвестиции. Любая из задач зависит от многих переменных и имеет, как правило, большое количество вариантов решения. Варианты могут отличаться друг от друга как одним, так и несколькими показателями. Одним из самых распространенных методов оценки экономической эффективности мероприятия является метод сравнения вариантов. Сравнительный анализ требует использования специальных методов, позволяющих находить решение кратчайшим путем [1].

В работе анализируется использование 2 статических методов (минимум приведенных затрат, срок окупаемости), соответствующих плановой экономике, и 1 динамического метода (чистый приведенный эффект ΔNPV), соответствующего рыночной экономике, при проектировании и реконструкции энергетических объектов. Расчеты показали, что

- при проектировании электрической сети совпадение по всем трем критериям составляет 72,2%. Устойчивость полученных результатов сохраняется при изменении тарифа на электроэнергию и стоимости оборудования;
- при замене трансформаторов совпадение составляет 52,9%;
- при реконструкции воздушных ЛЭП совпадение составляет 33%;
- критерий ΔNPV показывает нецелесообразность замены трансформаторов и реконструкции ЛЭП в 100% случаев.

При проектировании сети все варианты имеют одинаковые составляющие экономических показателей — инвестиции, постоянные и переменные издержки. Поэтому совпадение результатов по всем трем критериям более вероятно. Для выбора лучшего варианта можно использовать любой критерий. При реконструкции сети в действующей сети присутствуют только постоянные и переменные издержки, а в варианте реконструкции есть и значительные инвестиции. Поэтому для оценки целесообразности реконструкции можно рекомендовать критерий «срок окупаемости».

Литература

1. **Сергеев, И.В.** Экономика организации (предприятия): учебник и практикум для вузов / И.В. Сергеев, И.И. Веретенникова. — 6-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 511 с.

М.В. Сечина, асп.;

рук. И.А. Бершадский, д.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

МЕТОД АНАЛИЗА ИСКРБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ВО ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЕ

Искробезопасное электрооборудование, являясь наиболее безопасным по взрывозащите для систем мощностью до 150 Вт, имеет минимальный вес, размеры, просто изготавливается. В работе [1] был обоснован и апробирован метод оценки электровзрывобезопасности, в основе которого лежит динамическая модель коммутации в индуктивно-резистивной цепи.

Однако область применения метода при низких ЭДС (<8 В) для индуктивных цепей и больших размыкаемых токов осталась малоизученной. В связи с этим создана модель размыкания произвольной индуктивно-резистивной цепи (рис. 1).

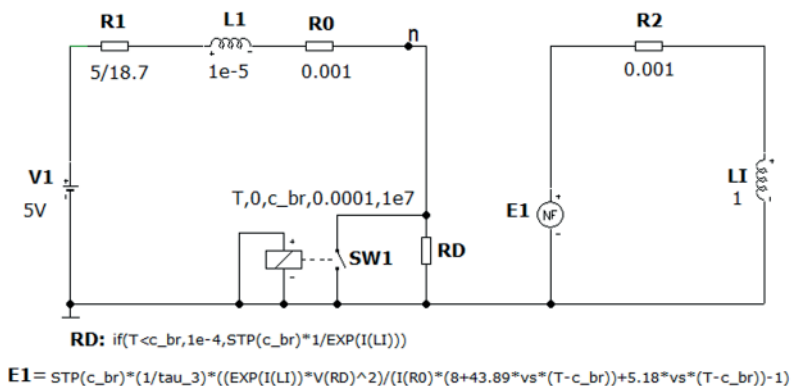


Рис. 1. Схема структурная преобразователя

В среде программирования Micro-Cap-12 в разрыв испытуемой электрической цепи присоединен блок дугового размыкания RD. Коммутация производится в момент времени c_{br} . Компьютерная модель метода дает возможность получить исходные данные оценки: энергию разряда W_p , длительность разряда T_p . Добавлена директива с расчетными коэффициентами для определения воспламеняющей энергии метановоздушной смеси W_g при разных скоростях коммутации vs .

Литература

1. И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, В.В. Иванилов. Анализ электровзрывобезопасности на основе динамических моделей разряда при коммутации электрической цепи // Электричество. — 2022. — № 2. — С. 19-28.

Е.М. Ляхов, студ.; рук. А.В. Захаров, ассистент (ДонНТУ, Донецк)

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА EB-310

В настоящее время, в связи с решением ряда исследовательских и прикладных задач в области медицинской и сервисной робототехники, возникла необходимость в создании коллаборативного робота-манипулятора, предназначенного для апробации новых концепций управления и взаимодействия с человеком.

В качестве экспериментальной платформы был выбран манипулятор EB-310 благодаря его доступности, простоте конструкции и компактным размерам. Такая модель удобна для отработки базовых алгоритмов и проведения экспериментов в ограниченных лабораторных условиях [1].

Однако, несмотря на наличие базового программного обеспечения для управления манипулятором, в нём отсутствуют средства решения обратной кинематики. Это ограничивает возможности точного позиционного управления и делает актуальной разработку собственного алгоритма в среде Robot Operating System 2 (ROS 2) — современной модульной платформы, обеспечивающей создание, отладку и тестирование алгоритмов в виртуальной среде с возможностью последующего переноса на реальное оборудование.

В смежных проектах для моделирования манипулятора Pulse-75 применялась среда CoppeliaSim, обеспечивающая построение трёхмерных моделей и визуализацию кинематических процессов. Этот инструмент эффективен для исследования структуры робота и отладки движений в симуляции, однако его функциональность ограничивается виртуальной средой и не предоставляет удобных средств перехода к работе с физическим устройством.

На первом этапе создаётся URDF-модель робота, размещаемая в пакете eb310_description, с дальнейшей визуализацией в RViz2. Для решения задач позиционирования подключается пакет MoveIt 2, предоставляющий инструменты для вычисления прямой и обратной кинематики, генерации траекторий и моделирования движений с учётом ограничений. Архитектура ROS 2 основывается на взаимодействии независимых компонентов через механизмы обмена данными, что обеспечивает гибкость, расширяемость и устойчивость системы управления в реальном времени [2].

Литература

1. «Collaborative Robotic Arm EB-310» / ToolBox Robotics. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://toolboxrobotics.com/robotic-arm-eb310>
2. **Ху Чуньюй, Ли Цяолун.** ROS 2. Программирование интеллектуальных роботов. — М.: ДМК, 2025. — 544 с.

Р.А. Кузьменко, студ.; рук. А.В. Захаров, ассистент (ДонНТУ Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СНАББЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

В силу повсеместного распространения импульсной преобразовательной техники вопросы оптимальной коммутации полупроводниковых ключей являются достаточно актуальными.

Среди электронных схем, обеспечивающих коммутацию ключа, широкое распространения получили снабберные цепи. Различают пассивные C, RC, RCD, снабберы, устанавливаемые параллельно полупроводниковому ключу [1]. Простой C снаббер позволяет компенсировать паразитную индуктивность присутствующую любой реальной электрической цепи. Введение R составляющей позволяет достичь ускорения переходного процесса, добавление диода сокращает потери на резисторе. Переходные процессы коммутации идеального IGBT при различных снабберах представлены на рисунке 1.

Характер переходного процесса при замыкании определяется классическими соотношениями для последовательной RLC цепи. Обычно, сложности коммутации происходят при запираании, проходящем быстрее.

Проведение серии опытов с различными вариациями снабберов и наблюдение осциллограмм, подтвердило теоретические положения и необходимость вышеперечисленных конфигураций. Наиболее оптимальной схемой при коммутации малых и средних мощностей является RCD снаббер с дополнительной шунтировкой нагрузки оппозитным диодом. На рисунке 2 изображена осциллограмма управляющего воздействия, полученного при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и напряжения на ключе; сигнал напряжения имеет жёсткие фронты и малое перенапряжение, что и требуется для оптимальной коммутации [2].

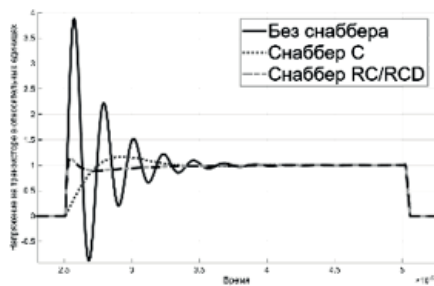


Рис. 1. Моделирование переходного процесса

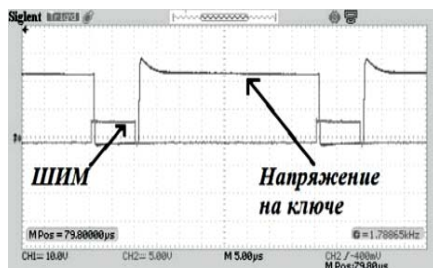


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма

Литература

1. Павел Новиков. Снаббер — это просто // Журнал «Силовая электроника», 2019, № 2. с. 4–7.
2. Paul Lee. Markus Herdin. Выбор, проектирование и расчет схемы снаббера // Журнал «Силовая электроника», 2022, № 2 с. 8–11.

С.С. Шестаков, студ.;
рук. А.В. Захаров, асс. кафедры (ДонНТУ, Донецк)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ АВАТАРОМ КИСТИ РУКИ

В области робототехники и человеко-машинного взаимодействия актуальной задачей является создание интуитивных систем управления, позволяющих точно воспроизводить движения кисти человека [1]. Традиционные подходы с использованием контактных датчиков ограничивают естественность движений, что обуславливает необходимость разработки бесконтактных решений на основе машинного зрения [2].

Разработана система управления электромеханическим аватаром кисти, использующая алгоритмы компьютерного зрения для распознавания жестов в реальном времени. В качестве технической платформы выбраны микроконтроллер Arduino Nano и сервоприводы SG90, обеспечивающие необходимое количество степеней свободы и точность позиционирования. Механическая часть системы реализована с использованием 3D-печати, что позволило создать легкую и прочную конструкцию, точно воспроизводящую анатомические особенности человеческой кисти. Обработка видео осуществляется с использованием языка программирования Python. Минимальные требования: процессор Intel Core i3, 4 ГБ RAM, камера с разрешением HD 720p.

Программная реализация интегрирует библиотеки OpenCV и MediaPipe для обработки видеопотока и детекции ключевых точек кисти. Алгоритм работы системы включает захват видео, анализ положения пальцев, расчет углов сгиба и передачу управляющих сигналов на исполнительные механизмы через последовательный интерфейс. Для обеспечения плавности движений применена библиотека ServoSmooth, устраняющая резкие изменения положения сервоприводов и обеспечивающая естественную кинематику пальцев.

Преимуществом системы является возможность использования различных источников видеопотока, включая веб-камеры компьютера и камеры смартфонов. Созданный прототип демонстрирует перспективность применения машинного зрения для задач управления в робототехнике, реабилитационной медицине и разработке человеко-машинных интерфейсов.

Литература

1. **Valenti R. et al.** A Linear Kalman Filter for MARG Orientation Estimation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016.
2. **Bradski G., Kaehler A.** Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 2008.

*И.П. Васьковский, аспирант;
рук. Д.В. Полковниченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЧЕТА ОТКЛОНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Традиционные методы диагностики, опирающиеся на анализ токов и напряжений асинхронного двигателя (АД), часто оказываются недостаточно эффективными в условиях современных промышленных сетей, характеризующихся высоким уровнем гармоник и других искажений формы сигнала. Проблема заключается в том, что эти искажения, генерируемые различными источниками (частотные преобразователи, импульсные источники питания и др.), влияют на параметры электрической сети и создают ложные сигналы, усложняя идентификацию реальных дефектов АД. Неучёт влияния качества электроэнергии (КЭ) приводит к диагностическим ошибкам, преждевременной замене исправного оборудования и увеличению простоев.

Современный подход к диагностике АД предполагает комплексный учет показателей КЭ в питающей сети. Речь идет о мониторинге коэффициента мощности, коэффициента искажения гармоник, степени пульсации напряжения и других параметров, которые могут существенно повлиять на работу двигателя. Интеграция этих данных в алгоритмы диагностики позволяет отфильтровать сетевые искажения и более точно выявлять отклонения в работе самого двигателя.

Существуют различные методы учета КЭ при диагностике. Один из них — компенсация искажений с помощью математических моделей, отражающих влияние конкретных гармоник на поведение АД [1]. Другой — разработка специализированных фильтров, выделяющих полезные сигналы из общего фона [2]. Наиболее перспективным направлением является использование методов машинного обучения, способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и автоматически определять оптимальные параметры диагностики на основе анализа статистических данных и текущего состояния электрической сети.

Литература

1. **Немцев Г.А.** Влияние высших гармонических составляющих на работу асинхронных двигателей / Г.А. Немцев, Е.А. Селезнев, Л.А. Шестакова // Вестник Чувашского университета. — 2014. — № 2. — С. 46–51.
2. **Мисюра В.В.** Обработка и фильтрация сигналов. Современное состояние проблемы / В.В. Мисюра, И.В. Мисюра // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4(27). — С. 249–255.

И.А. Мельников, студ.;
рук. С.А. Гришанов, ст. преп. (ДонНТУ, Донецк)

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СЕТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Как известно, наиболее часто используемой в электроэнергетике является задача расчета токов короткого замыкания (КЗ) [1]. Выполнение расчетов токов КЗ необходимо, в первую очередь, при проектировании объектов электроэнергетических систем (ЭЭС), а также при решении задач текущей эксплуатации ЭЭС. В настоящее время для решения задачи расчета токов КЗ в рамках исследования аварийных режимов в ЭЭС наиболее широко используются специализированные программно-технические комплексы и компьютерные программы как отечественной, так и зарубежной разработки. Но, к сожалению, они не всегда позволяют решать задачу расчета токов КЗ при сложных видах повреждений: многократных КЗ, сочетания КЗ и обрывов проводов, сложных несимметричных КЗ и др. Также многие программы используют упрощенные подходы в расчетах токов КЗ (нет учета полной схемы замещения элементов электрической системы). В тоже время комплекс PowerFactory позволяет решать задачи с учетом полной схемы замещения элементов сети. Целью данной работы является анализ влияния параметров схемы замещения линий и трансформаторов на характер переходного процесса при КЗ и оценка адекватности полученных результатов моделирования с использованием PowerFactory. Исследуемым объектом является электрическая система напряжением 110/35 кВ. Участок сети состоит из источника питания, однотипных трансформаторов ТДТН-40000/110/35 и линий АС-240 – АС-120. В качестве аварийной ситуации выступает КЗ на шинах ПС (ВН, СН, НН). Исследуется два вида КЗ (трехфазное и однофазное) длительностью 0,15 с. По результатам расчета сделан вывод, что параметры схемы замещения имеют значительное влияние на характер протекания переходного процесса при КЗ. Расчет аварийного режима при использовании всех параметров схемы замещения дает полную картину переходного процесса. При представлении схемы замещения сети только индуктивными сопротивлениями расчет переходных процессов значительно упрощается. Это дает возможность рассчитать требуемые величины установившегося тока КЗ с использованием упрощенных методик, но нет полной картины переходного процесса, что в случае решения задач текущей эксплуатации (настройка устройств РЗА) может быть критично.

Литература

1. **Ларин, А.М.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие / А.М. Ларин, Д.В. Полковниченко, И.Б. Гуляева. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. — 268 с.

*С.В. Ковальская, соискатель;
рук. С.А. Гришанов, ст. преп. (ДонНТУ, Донецк)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТГ НА ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

Математические модели элементов ЭЭС могут иметь различную степень соответствия объекту-оригиналу. Как правило, исследователь стремится к более полному и точному отражению свойств объекта, что в свою очередь, приводит к усложнению самой модели. Для анализа асинхронных режимов (АР) отдельное внимание следует уделить моделям синхронных генераторов (СГ). Как известно из анализа работ отечественных и зарубежных авторов, наиболее полно и точно физические явления, происходящие при переходных процессах в роторе СГ, воспроизводятся системой диф. уравнений Парка-Горева при учете массива ротора многоконтурными схемами замещения, параметры которых получены на основе экспериментальных данных [1]. В ряде инженерных расчетов широко используются упрощенные, классические модели СГ: синхронная машина представляется в виде эквивалентного сопротивления и постоянной переходной ЭДС. Существуют модели с переменными параметрами, характеризующими массив ротора. А также модель оптимальной сложности на основе уравнения движения ротора, дополненного выражением для расчета асинхронного момента. Ее использование по сравнению с классическими моделями позволяет учесть физические процессы в роторе при незначительном увеличении времени моделирования. Целью данной работы является получение оптимальной модели СГ, адаптирующейся к режиму при оценке асинхронных режимов работы. В работе выполнен сопоставительный анализ результатов моделирования АР для ряда СГ. По результатам исследований установлено, что минимальная по сложности математическая модель СГ должна быть представлена схемой замещения с двумя демпферными контурами, что соответствует стандарту IEEE Std 1110–2019. Также установлено целесообразность использования модели СГ с одним, но переменным контуром, для исследования АР. Использование модели оптимальной сложности также дает приемлемые результаты моделирования.

Литература

1. **Ларин А.М.** Оценка точности определения параметров схем замещения синхронных генераторов в соответствии со стандартом IEEE Std 1110™-2019 / А.М. Ларин, С.А. Гришанов // Радиотехника, электротехника и энергетика: Тридцать первая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (13–15 марта 2025 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2025. — С. 1236.

Д.В. Яковенко, студ.;

рук. Д.В. Полковниченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ АЧР В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

На данный момент работа энергосистемы Луганской Народной Республики характеризуется риском выделения на изолированную работу от ЕЭС России в результате единичного нормативного возмущения. Сама энергосистема Луганской Народной Республики большую часть времени является энергодефицитной, в связи с чем выделение данной энергосистемы на изолированную работу характеризуется снижением частоты и работой автоматики ограничения снижения частоты (АОСЧ). Одной из основных противоаварийных автоматик, направленных на ограничение снижения частоты электрического тока, является автоматическая частотная разгрузка (АЧР) [1].

Средства прогнозирования работы АЧР в первую очередь необходимы для определения предполагаемого значения уровня частоты электрического тока, до которого снизится частота в случае выделения на изолированную работу, анализа риска срабатывания технологических защит генерирующего оборудования, расположенного в выделяемой части энергосистемы, определения объема нагрузки потребителей, отключаемых действием АОСЧ и определения необходимых объемов графиков временного отключения потребления, вводимых для повышения уровня частоты электрического тока до значений, при которых возможно выполнить синхронизацию изолированно работающей энергосистемы с ЕЭС России.

При этом использование полноценных математических моделей энергосистемы для расчета переходных процессов и динамической устойчивости энергосистем затруднено ввиду необходимости подготовки специальной расчетной модели, в которую будут включены все объекты, реализующие действия АОСЧ, а также из-за значительных временных затрат, необходимых на проведение самого расчета программными комплексами.

В таких условиях требуется разработка «упрощенного» средства анализа и прогнозирования работы АОСЧ, которая позволит проводить подобные расчеты в сравнительно короткие сроки, необходимые при оперативном управлении энергосистемой.

Литература

1. **Карпеченко А.А.** Исследование эффективности автоматической частотной разгрузки энергорайона / А.А. Карпеченко ; науч. рук. Д.А. Секацкий // Актуальные проблемы энергетики : материалы 72-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Минск: БНТУ, 2016. — С. 178–181.

А.А. Ткачев, студ.; рук. В.Г. Черников, к.т.н. (ДонНТУ, Донецк)

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ КОНТУРА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОКОЛЕСА

Совершенствование систем регулирования ветрогенераторных установок является важной научно-практической задачей, решение которой обеспечивает стабильную работу оборудования установки и качество энергии, отдаваемой в сеть. Как отмечено в [1], наиболее сложным с точки зрения оптимизации является контур регулирования скорости вращения ветроколеса, структурная схема которого показана на рис. 1. Сложность регулирования в этом контуре заключается в наличии нелинейного звена, связывающего установочный угол лопасти $\delta_{ист}$ и коэффициент мощности ветроколеса c_{pw} при различных значениях быстроходности λ . Для адаптации регулятора скорости ветроколеса к указанной нелинейности используют либо аппроксимирующие функции, либо нейросеть, связывающую указанные параметры. Однако в таком случае адаптивному дискретному регулятору приходится выполнять значительное количество вычислительных операций для определения нелинейного коэффициента k_{w1} , см. рис. 1. Поэтому, для такого регулятора было проведено исследование, демонстрирующее, что современные контроллеры способны выполнить необходимое количество вычислительных операций за короткий период дискретности системы, ограниченный значением $1/10$ от малой постоянной времени контура $4 \cdot T_w$.

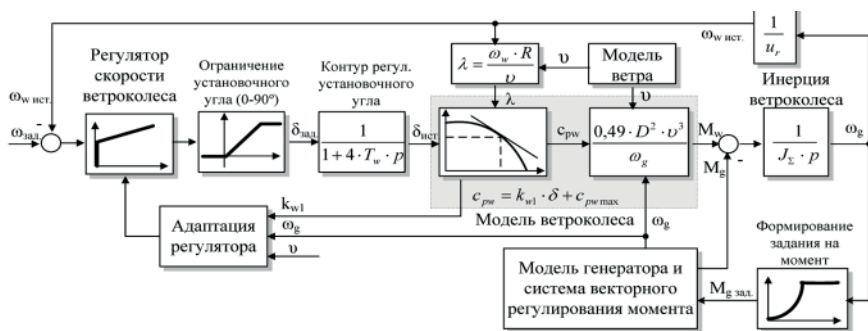


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования скорости ветроколеса

Литература

1. Черников, В.Г. Разработка методики определения параметров адаптивного дискретного регулятора скорости вращения ветроколеса / Черников В.Г. // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». — Донецк, 2022. — № 1(24). — С. 13–28.

Б.А. Дворецкий студ.; рук. А.А. Булгаков, к.т.н. (ДонНТУ, Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Обеспечение статической устойчивости является одним из основных требований, предъявляемым к электрическим системам [1, 2].

Для простейшей электрической системы без учета влияния переходного процесса в роторе генератора и АРВ, переходный процесс описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка

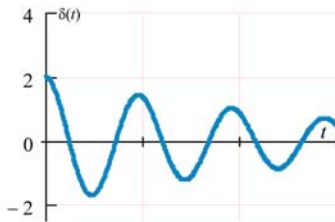
$$T_j p^2 \delta + T_d p \delta = P_T - P_{эл},$$

где T_j — постоянная инерции генератора, P_d — мощность демпфирующей обмотки, P_T — мощность турбины, $P_{эл}$ — электромагнитная мощность генератора. Оценка состояния системы выполняется по корням характеристического уравнения

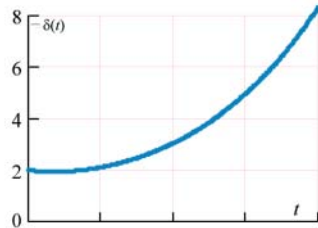
$$T_j p^2 + P_d p + c_1 = 0,$$

где c_1 — синхронизирующая мощность.

Для исследования статической устойчивости простейшей электрической системы разработан файл в программе *Mathcad*, на основе которого выполнены расчеты и проведен анализ (рис. 1) статической устойчивости при различных значениях параметров элементов системы и мощности явнополюсного и неявнополюсного генератора.



(а)



(б)

Рис. 1. Характер протекания переходного процесса: устойчивая (а), неустойчивая система (б)

Литература

1. **Веников В.А.** Переходные электрические процессы в электрических системах. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1985. — 535 с.
2. **ГОСТ Р 58058-2018.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Устойчивость энергосистем. Нормы и требования. — Введ. 2019-03-01. — М.: Стандартинформ, 2018. — 15 с.

*А.М. Сабельникова, студ.;
рук. А.А. Булгаков, к.т.н. (ДонНТУ, Донецк)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 110 КВ

Развитие электрических систем может приводить к повышению уровней токов коротких замыканий (КЗ). В электрических сетях 110 кВ и выше, где применяются эффективно и глухо заземленные нейтрали, ток однофазного КЗ может превышать ток трехфазного КЗ. Основная цель ограничения токов однофазных КЗ — это приведение их значений в соответствие с допустимыми, указанными в технических условиях и стандартах на проводники, аппараты и оборудование распределительных устройств электрических станций, подстанций и линий электропередачи, а также повышение надежности работы оборудования [1].

В исследовании выполнено моделирование таких способов ограничения тока однофазного КЗ:

- разземление нейтралей у части силовых трансформаторов в сети;
- включение дополнительных активных и индуктивных сопротивлений в нейтраль силовых трансформаторов.

Расчеты токов однофазного КЗ проводились с использованием правила эквивалентности прямой последовательности. Рассмотренные мероприятия не изменяют ток трехфазного КЗ, поскольку влияют лишь на схему замещения нулевой последовательности (НП). Величины активных и реактивных сопротивлений, включаемых в нейтраль трансформаторов, приняты 10–30% от сопротивления соответствующего трансформатора. При включении индуктивного x_N сопротивления в нейтраль двухобмоточного трансформатора, который представляется в схеме замещения сопротивлением x_T , результирующее сопротивление данной ветви в схеме замещения НП определяем по выражению:

$$x_{\Sigma} = x_T + 3x_N$$

Выполненный анализ результатов моделирования показал, что в рассматриваемой электрической сети разземление нейтралей у части силовых трансформаторов оказалось эффективнее для ограничения токов однофазного КЗ, чем включение дополнительных сопротивлений в нейтраль.

Литература

1. РД 34.20.176-84. Руководящие указания по ограничению токов однофазных коротких замыканий в электрических сетях 110–220 кВ энергосистем. — М.: Минэнерго СССР, 1984.

Д.В. Костюк студ.; рук. Э.Г. Куренный, д.т.н. (ДонНТУ, Донецк)

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Нормативные документы по терминологии и определениям электротехники не содержат определений неактивных составляющих полной мощности при несинусоидальном токе и напряжении [1]. Рассматривается модель действительной полной мощности по Дрехслеру [2], которая для трехфазных трехпроводных систем электроснабжения представляется выражением:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + N_2^2}. \quad (1)$$

где P — активная мощность, Q — реактивная мощность, D — мощность искажения, вызванная присутствием высших гармоник токов, N_2 — мощность пульсации, вызванная несимметрией потребления.

В исследовании применяется вероятностная модель, где составляющие недетерминированной действительной полной мощности рассматриваются как случайные величины с нормальным законом распределения [3]. Характеристиками являются средние значения P_c, Q_c, D_c, N_{2c} и среднеквадратические отклонения $\sigma_P, \sigma_Q, \sigma_D, \sigma_{N2}$.

Преобразование (1) является нелинейным, поэтому задача нахождения аналитических выражений в общем виде для плотности f_S и интегральной функции F_S действительной полной мощности для принятой модели является сложной, однако может быть получено статистическое решение. Практическое моделирование выполнено для массивов $n = 20$ тыс. ординат.

В результате моделирования получены статистическая интегральная функция распределения и гистограмма распределения полной мощности. Выполнена проверка согласования полученного статистического закона распределения с нормальным распределением по критериям согласия Колмогорова и хи-квадрат.

Литература

1. Баланс энергий в электрических цепях / Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. — Киев: Наук. думка, 1992. — 312 с.
2. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке; перевод с чеш. А.А. Окина. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 113 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — 4-е изд., стер. — Москва : Наука, 1969. — 576 с.

И.А. Горпинич, студ.;

рук. В.И. Калашников, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ — ЭЛЕКТРОЛИЗЁР

Учитывая использование угля в качестве исходного топлива на тепловых электростанциях Донбасса в ближайшей и дальней перспективе, возникает необходимость разработки новых технологий производства электроэнергии в этих условиях.

Среди инновационных технологий наиболее перспективны комплексные углеводородные энергоустановки на основе топливных элементов, производящие в едином цикле синтез-газ, электрическую и тепловую энергию, а также электронное топливо с использованием возобновляемых источников энергии [1]. Для утилизации выделяемого в технологическом процессе диоксида углерода (CO_2) используется устройство гидрирования CO_2 с применением возобновляемых источников энергии для получения водорода.

В работе рассматривается солнечная установка, непосредственно работающая на РЕМ-электролизёре без использования DC/DC — преобразователя. При переменной освещённости, вследствие погодных условий, ток и скорость электролиза падает. Впервые показано влияние использования фильтра на выходе солнечной установки на стабилизацию тока и генерацию водорода при колебаниях освещённости. Использование фильтра сглаживает процесс электролиза, а средняя выработка водорода увеличивается. Математическое моделирование подтвердило правильность принятых решений.

Результаты работы будут использованы при проектировании экспериментальной комплексной углеводородной энергоустановки на базе учебно-научного центра «Smart Grid — ДонНТУ».

Литература

1. **Левшов А.В.** Перспективы развития возобновляемой энергетики Донбасса / А.В. Левшов, В.И. Калашников // Промышленная энергетика. — 2025. — № 4. — с. 27–32.

М.К. Маренич, асп.; И.Б. Гуляева, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДАТЧИКА КОНТАКТА «ФАЗА — КОРПУС» В СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ — ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ АКТУАЛЬНОЙ ПРОБЛЕМЫ

Обязательное заземление корпусов электродвигателей посредством центральных проводов (ЦП) — так называемых «заземляющих жил» силовых кабелей электропитания представляет собой опасность смертельного электропоражения человека при касании его к фазному проводнику, поскольку вследствие присоединения ЦП к заземлению создаётся ёмкостная проводимость между фазами сети и землёй [1]. Техническое решение [2] позволяет отказаться от применения ЦП в качестве элемента заземления. Датчиком контакта «фаза — корпус» является цепь R1-C1-K1-VD1, присоединённая между статором асинхронного двигателя и его корпусом (рис.1). Срабатывание защиты (реле K2) произойдёт как в случае контакта фазы с ЦП (в структуре кабеля), так и при контакте фазы с корпусом двигателя (вследствие срабатывания реле K1). Работоспособность устройства подтверждена экспериментально.

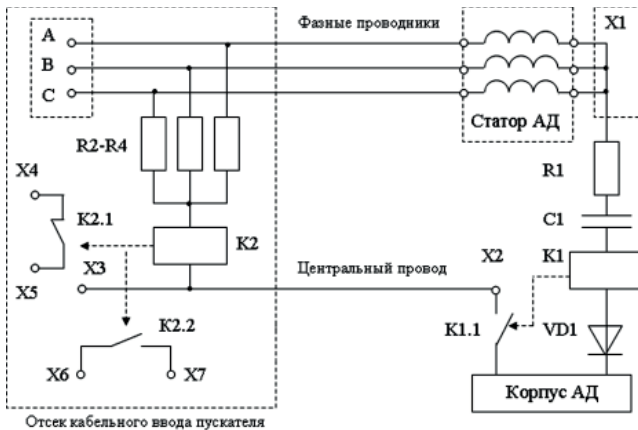


Рис. 1. Устройство защиты от повреждения в присоединении статора двигателя

Литература

1. Денисова Е.В., Гуляева И.Б., Маренич М.К. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения / Горная промышленность. Научно-техн. и производств. журнал № 4/2022 — С. 116–124.
2. Патент на изобретение 2832720 (RU), МПК (2006.01) H02H3/02; H02H7/08 Устройство для выявления повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, И.Б. Гуляева — 2024109616. Заявл. 09.04.2024. Оpubл. 28.12.2024. Бюл. № 1.

*А.С. Сергиенко, соиск.; рук. В.А. Павлюков, к.т.н., доц.;
рук. С.Н. Ткаченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)*

АНАЛИЗ СОСТАВА ОПТИМИЗИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СИНТЕЗЕ ДВУХКОНТУРНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Двухконтурные Т-образные эквивалентные схемы замещения (ЭСЗ) широко используются для моделирования переходных режимов работы асинхронных приводов. Они включены в популярные пакеты MathWorks® MATLAB®, ETAP® и др.

Минимальный состав оптимизируемых параметров ЭСЗ был предложен еще в [1]: активное и индуктивное сопротивления первого ($R_{r2}, X_{\sigma r2}$) и второго ($R_{r2}, X_{\sigma r2}$) контуров обмотки короткозамкнутого ротора. Сопротивления цепи статора ($R_s, X_{\sigma s}$) и цепи взаимодуляции (X_{μ}) определялись по аналитическим зависимостям.

В [2] минимальный состав был дополнен $X_{\sigma s}$, что привело к спонтанному перераспределению сопротивлений статора и ротора во входном сопротивлении АД. Для исключения подобного дисбаланса в [3] была предложена связка $X_{\sigma s} = X_{\sigma r2}$. Вместе с тем в [3] также был расширен состав оптимизируемых параметров еще и активным сопротивлением статора, что в ряде случаев приводило к получению локального минимума вместо глобального и к недопустимому искажению входной частотной характеристики АД, как это показано в [4].

В работе предлагается не вводить в число оптимизируемых параметров: активное сопротивление статора в связи с искажением расчетных пусковых и частотных характеристик и индуктивное сопротивление рассеяния статора либо при этом применять связку $X_{\sigma s} = X_{\sigma r2}$, исключающую спонтанное перераспределение сопротивлений статора и ротора во входном сопротивлении АД.

Литература

1. **Сыромятников, И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Сыромятников — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 528 с.
2. **Совпель, В.Б.** Синтез эквивалентных схем замещения асинхронных глубокопазных двигателей / Совпель В.Б., Воробей П.И., Трунов Е.Л. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1982. — № 3. — С. 154–155.
3. **Pedra, J.** On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs / J. Pedra // IEEE Transactions on Power Systems. — 2008. — vol. 23, № 4 — P. 1709–1718.
4. **Pavlukov, V.A.** Identification of Quasi-Global Extrema in the Calculation of Induction Motor Double-Loop Equivalent Circuit Parameters Using Numerical Methods / V.A. Pavlukov, S.N. Tkachenko // The Proceedings of 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. — 2023. — P. 727–731, doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291127

*Б.А. Калиниченко, студ.; А.Ю. Козлов студ.;
рук. Д.Н. Мирошник, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)*

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Современные роботы-манипуляторы уже применяются в многих областях (автоматизированные линии по производству машиностроительной продукции, пищевая промышленность, логистика и складирование, медицина и фармацевтика, сфера услуг) и за счет своих универсальных свойств занимают все новые и новые области использования. Подобные инструменты характеризуются гибкостью в перепрограммировании под новые задачи, работают без останова с высокой точностью. Однако недостатками роботов-манипуляторов является их сложность в эксплуатации и высокая стоимость.

Цель работы является создание прототипа шестиосевого робота-манипулятора.

Работа по разработке прототипа проводилась в рамках сотрудничества с Институтом неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака, где существует необходимость в использовании подобного устройства.

За основу будущего манипулятора был взят проект [1], который полностью был напечатан на 3D принтере. Движение суставов осуществляется тремя сервоприводами nema23 и nema17. Они, в свою очередь, приводят в движение специально разработанные для этой модели пластиковые планетарные редуктора с передаточным числом 41:1. Управление происходит при помощи контроллера arduino mega 2560, отдающего команды драйверам — M6600.

При сборке прототипа установлена важность использования экранированных слаботочных проводов, с целью предотвращения случайных ошибок.

Итогом выполненной работы стало создание рабочего прототипа медицинского робота-манипулятора, отличающегося простотой управления и относительно невысокой стоимостью. Из недостатков следует выделить сильную вибрацию конструкции, которая вызвана действием шаговых двигателей, а также недостаточной жесткостью пластиковых ребер и редукторов. Уменьшение амплитуды колебаний манипулятора возможно за счет усиления конструкции ребер, замены материала редукторов, а также применения специальных алгоритмов гашения колебаний.

Литература

1. Robot Arm EB300 // URL: <https://www.thingiverse.com/thing:6283770/files>. — Режим доступа: свободный.

М.В. Складчиков, асп.;
рук. П.И. Розкаряка, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Современные технологии искусственного интеллекта, особенно сверточные нейронные сети, открывают новые возможности для диагностики электромеханических систем. Эти сети эффективно анализируют данные и выявляют неисправности, используя типовые датчики, что снижает затраты на оборудование [1].

В данной работе представлены результаты экспериментальной верификации нейросетевой идентификации неисправностей асинхронного двигателя, связанных с несимметрией статорной обмотки. Методология базируется на анализе токов статора в нормальных условиях эксплуатации и при искусственно созданном межвитковом коротком замыкании обмоток статора, путем изменения активного сопротивления обмотки. Описанный подход позволяет имитировать межвитковое замыкание в обмотке статора, создав несимметрию токов статора — основной признак такой неисправности.

Для проверки работоспособности алгоритма выбран асинхронный двигатель (мощность — 0,25 кВт, ток 1,03 А, напряжение 380 В, количество оборотов в минуту — 685, сопротивление обмотки статора — 66,8 Ом) Межвитковое короткое замыкание имитировалось изменением сопротивления обмоток статора. Токи статора измерялись шунтами и оцифровывались АЦП с частотой 10 кГц многоканальным регистратором электрических сигналов «РЕКОН — 08 МС», а данные обрабатывались для анализа и дальнейшего создания базы обучения для нейронной сети.

Проведённое исследование продемонстрировало возможность верификации несимметрии токов статора с использованием сверточной нейронной сети, разработанной в Deep Learning Toolbox. В дальнейшем планируется расширение области применения алгоритма, включая изучение механических неисправностей (например, износ подшипников), с последующей экспериментальной верификацией и адаптацией для надежной диагностики в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. **Skowron, M.** Convolutional neural network-based stator current data-driven incipient stator fault diagnosis of inverter-fed induction motor / M. Skowron, T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, C. Kowalski. — Energies 2020. — p. 21.

О.Е. Жук, студ.; рук. П.И. Розкаряка, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СТАНКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ БИОПЕЧАТИ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

Биопечать — одно из наиболее перспективных направлений современной инженерии, связанное с послойным созданием органических 3D-структур из биоматериалов, например, кожных тканей для лечения ожогов. Для реализации этого процесса требуется разработать электромеханический комплекс, обеспечивающий высокоточную дозировку биогеля и прецизионное управление положением печатающего узла.

В качестве базовой платформы предлагается использование 3D-принтера с декартовой кинематикой [1], основанного на принципах FDM-печати. Конструкция включает три оси перемещения, приводимые в движение шаговыми двигателями. Такое решение отличается доступностью комплектующих, простотой сборки и высокой модифицируемостью, что делает установку удобной для отработки алгоритмов управления и проведения экспериментальных исследований в области биопечати.

Управление системой предлагается реализовать на основе модифицированной прошивки Marlin, адаптированной для задач биопечати со шприцевым экструдером. Она обеспечивает контроль скорости подачи, температуры и параметров движения, позволяя работать с вязкими биочернилами, включая гидрогели и клеточные суспензии [2].

Ключевым узлом является экструдер Enderstruder — шприцевой механизм с шаговым приводом, который обеспечивает равномерное давление, устойчивую подачу биоматериала и низкий риск образования пузырей воздуха, что повышает выживаемость клеток во время печати [1].

Данная работа будет основой для создания в будущем более сложной системы, отличающейся от аналогов пониженной стоимостью и универсальностью, что позволит ей стать перспективной платформой для клеточных исследований в создании 3D-конструктов.

Литература

1. **Cordova D.J.** The Enderstruder: An accessible open-source syringe extruder compatible with Ender series 3D printers / D.J. Cordova, A.A. Rodriguez, S.C. Woodward, C.O. Crosby // HardwareX, 24 January 2024.
2. OSF | The Enderstruder: An accessible open-source syringe extruder compatible with Ender series 3D printers — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://osf.io/9arym/files>.

*О.В. Пеньков, соиск.; Е.Ю. Белоусова, соиск.;
рук. С.Н. Ткаченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Одним из типов современных ветроэнергетических установок (ВЭУ), применяющихся в мире, в том числе на ветровых электростанциях Донбасса, являются ВЭУ на базе асинхронных генераторов двойного питания (АГДП) [1, 2]. АГДП представляет собой трёхфазную асинхронную машину (АМ) с фазным ротором (ФР) в цепь, которого подключается полупроводниковый преобразователь. В его задачу входит формирование тока и напряжения в обмотке ротора, имеющего частоту текущего значения скольжения, что позволяет стабилизировать частоту генерируемого АГДП напряжения обмотки статора на уровне 50 Гц.

Исследование режимов работы ВЭУ не всегда осуществимы на практике по различным причинам. Актуальная задача — развитие математических моделей (ММ) АГДП, основанных на полных дифференциальных уравнениях. Точность ММ напрямую зависит от избранной эквивалентной схемы замещения (ЭСЗ) АМ с ФР и методов определения её параметров.

В данной работе предложен метод экспериментального определения параметров ЭСЗ АГДП с наличием контура потерь в стали магнитопровода статора и учётом эффекта вытеснения тока в обмотке ротора в виде двух параллельно включённых контуров. В отличие от существующих способов предусмотрена регистрация режимов АМ с ФР в двигательном режиме в опытах холостого хода, работы при различной нагрузке, а также опыта короткого замыкания при пониженном напряжении.

Корректная работа предложенного метода определения параметров ЭСЗ АГДП проверена, как на ПЭВМ с использованием РТС⁺ MathCAD[®], так и на экспериментальном стенде для АМ с ФР номинальной мощностью 2,0 кВт и номинальным напряжением статора 0,4 кВ.

Литература

1. Abad G., López J., Rodríguez M.A., Marroyo L, Iwanski G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation — Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011. — 620 p.
2. Ильин, Д.М. Верификация математической модели ветроэнергетической установки с асинхронным генератором с двойным питанием, созданной в НИУ “МЭИ” в Matlab Simulink на физической модели ВЭУ / Д.М. Ильин, Т.А. Шестопалова, А.Г. Васьков // Новое в российской электроэнергетике. — 2020. — № 6. — С. 17–25.

М.А. Нагорский, асп.;
рук. С.Н. Ткаченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В настоящее время в качестве основного типа электрических двигателей переменного тока (ЭДПТ), используемых в качестве электроприводных машин агрегатов и механизмов различных промышленных предприятий, а также системы собственных нужд (СН) тепловых и атомных электростанций являются асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) [1, 2]. Одним из путей повышения надёжности и увеличения срока эксплуатации является дальнейшее совершенствование тепловых защит (ТЗ) АЭД с КЗР.

В данной работе рассмотрен алгоритм ТЗ, основанный на тепловой модели (ТМ) асинхронного двигателя по данным контроля режимных параметров (скольжение, мгновенные значения фазных токов и напряжений), дополненный модулем прогноза срока службы изоляции обмотки статора АЭД. В качестве ТМ использована трёхмассовая модель, представленная в [1], однако отличающаяся более упрощённым учётом скин-эффекта в короткозамкнутой обмотке ротора, что позволяет применять предложенную ТЗ АЭД в микропроцессорных терминалах релейной защиты и противоаварийной автоматики ЭДПТ низкой и средней вычислительной мощности. Модуль прогноза состояния изоляции обмотки статора выполнен аналогично алгоритму, представленному в [3].

Работоспособность предложенного в работе усовершенствованного алгоритма тепловой защиты и диагностики состояния изоляции обмотки статора АЭД с КЗР проверена двумя способами — на математической модели на ПЭВМ (РТС[®] MathCAD[®]-программа) и на экспериментальной установке кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Литература

1. **Сивокобыленко, В.Ф., Ткаченко, С.Н.** Математическое моделирование комбинированной тепловой защиты глубокого асинхронного двигателя / Электрические станции. 2020. № 2 (2020). — С. 46–53.
2. **Ойрех, Я.А.** Режимы самозапуска асинхронных двигателей / Я.А. Ойрех, В.Ф. Сивокобыленко — М.: Энергия, 1974. — 96 с.
3. **Ткаченко, С.Н.** Прогнозирование срока службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на основе контроля параметров текущего режима / Завалишинские чтения 16 : сборник докладов, Санкт-Петербург, 11–15 апреля 2016 года / ГУАП. — Санкт-Петербург. — 2016. С. 246–249.

А.С. Хапченков, асп.;

рук. С.Н. Ткаченко, к.т.н., доц. (ДонНТУ, Донецк)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОДНОКОНТУРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время являются актуальными вопросы исследования режимов работы асинхронных электродвигателей (АЭД) с короткозамкнутым ротором (КЗР), являющихся ключевой электроприводной машиной переменного тока агрегатов системы собственных нужд современных электростанций, а также промышленных предприятий. Большую часть аномальных и аварийных режимов, как например, короткие замыкания, групповой и индивидуальный самозапуск, трудно проанализировать экспериментальным путём, поэтому для реализации данной цели целесообразно применять математические модели (ММ), основанные на полных дифференциальных уравнениях [1, 2]. Точность ММ напрямую зависит от применяемой эквивалентной схемы замещения (ЭСЗ) и методов определения её параметров.

В данной работе предложен усовершенствованный метод определения параметров одноконтурной ЭСЗ АЭД с КЗР с наличием контура потерь в стали магнитопровода статора, основанный на использовании каталожных данных, предоставляемых заводами-изготовителями асинхронных двигателей. В отличие от существующих способов учёт скин-эффекта выполнен в виде функциональных полиномиальных зависимостей активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния обмотки КЗР АЭД от величины скольжения, аналогично [3].

Корректная работа усовершенствованного метода определения параметров одноконтурной ЭСЗ с наличием контура потерь в стали магнитопровода статора АЭД с КЗР проверена на ММ на ПЭВМ с использованием пакета РТС® MathCAD® как в стационарных, так и динамических режимах для контрольных точек скольжения.

Литература

1. **Копылов, И.П.** Математическое моделирование электрических машин [Учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп.] / И.П. Копылов — М.: Высш. шк., 2001. — 327 с.
2. **Сивокобыленко, В.Ф.** Режимы работы, релейная защита и автоматика асинхронных электродвигателей / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Донецк: Изд-во «ИП Криничная И. В.», 2024. — 422 с.
3. **Клоков Б.К.** Расчёт вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации / Б.К. Клоков — Электротехника. — 1969. — № 9. — С. 25–29.

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ I — РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА	5
Секция 1. Теоретические основы радиотехники	6
Секция 2. Формирование колебаний и сигналов	15
Секция 3. Устройства обработки радиосигналов	23
Секция 4. Антенные устройства и распространение радиоволн	35
Секция 6. Оптико-электронное приборостроение	51
Секция 7. Радиосистемы навигации и связи	58
Секция 8. Фотоника	64
Секция 9. Промышленная электроника	79
Секция 10. Электроника и нанoeлектроника	98
Секция 11. Биомедицинская электроника	110
 НАПРАВЛЕНИЕ II — ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	129
Секция 12. Устройства и узлы систем интернета вещей.	130
Секция 13. Математическое моделирование	146
Секция 14. Прикладная математика	167
Секция 15. Вычислительная техника и САПР.	189
Секция 16. Вычислительные машины, сети и системы.	195
Секция 17. Управление и интеллектуальные технологии	215
Секция 18. Вычислительно-измерительные системы	247
Секция 19. Неразрушающий контроль и диагностика	263
 НАПРАВЛЕНИЕ III — БЕЗОПАСНОСТЬ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	273
Секция 20. Информационная безопасность	274
Секция 21. Прикладная и бизнес-информатика.	309
 НАПРАВЛЕНИЕ IV — ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ	394
Секция 22. Электромеханические преобразователи энергии	395
Секция 23. Физика и технология материалов и компонентов	429

Секция 24. Электротехнические и электромеханические системы и комплексы	447
Секция 25. Электрические и электронные аппараты	471
Секция 26. Электропривод и автоматика	511
Секция 27. Промышленные электротермические установки	532
Секция 28. Электродвижение и электроснабжение наземных транспортных средств	550
 НАПРАВЛЕНИЕ V — ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	562
Секция 29. Техносферная безопасность	563
 НАПРАВЛЕНИЕ VI — ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ	600
Секция 30. Общие вопросы экономики	601
Секция 31. Экономика промышленности	617
Секция 32. Менеджмент	633
 НАПРАВЛЕНИЕ VII — ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОНОМИКА ПРЕДПРИЯТИЙ	669
Секция 33. Промышленная электроэнергетика	670
Секция 34. Энергетика теплотехнологии	681
Секция 35. Инновационные технологии в теплоэнергетике и машиностроении	703
Секция 36. Энергетические системы и комплексы	716
Секция 37. Процессы и аппараты промышленной теплоэнергетики	726
Секция 38. Энергосбережение и промышленная экология	731
Секция 39. Промышленные теплоэнергетические системы	740
Секция 40. Электрохимическая и водородная энергетика	745
Секция 41. Экономика энергетики	759
 НАПРАВЛЕНИЕ VIII — ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА	779
Секция 42. Атомные электрические станции и установки	780
Секция 43. Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии	812
Секция 44. Теплофизика	832
Секция 45. Техника и физика низких температур	879
Секция 46. Нанотехнологии	896

НАПРАВЛЕНИЕ IX — ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	908
Секция 47. Котельные установки и охрана окружающей среды	909
Секция 48. Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС	913
Секция 49. Схемы и режимы работы тепловых электрических станций.....	928
Секция 50. Контроль, автоматизация и управление в энергетике.....	941
Секция 51. Теплотехника и малая распределенная энергетика	971
 НАПРАВЛЕНИЕ X — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ.....	997
Секция 52. Энергетические установки и двигатели.....	998
Секция 53. Проблемы технологии, надежности и конструирования	1028
Секция 54. Робототехнические и мехатронные системы	1053
 НАПРАВЛЕНИЕ XI — ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	1066
Секция 55. Электроэнергетические системы.....	1067
Секция 56. Электроснабжение	1073
Секция 58. Электрические станции.....	1089
Секция 59. Секция имени профессора Б.К. Максимова «Электрофизика и системы управления электроэнергетических объектов»	1093
Секция 60. Теоретические основы электротехники	1122
 НАПРАВЛЕНИЕ XII — ГИДРОЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	1133
Секция 61. Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии	1134
 НАПРАВЛЕНИЕ XIII — СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ.....	1160
Секция 62. Промышленный и медиа дизайн.....	1161
Секция 63. Электроэнергетика в военном деле.....	1175
Секция 64. Специальные вопросы электроэнергетики Донбасса.....	1183

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭНЕРГЕТИКА

**Тридцать вторая международная научно-техническая
конференция студентов и аспирантов**

Тезисы докладов

Оригинал-макет — ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“».

Тел.: (495) 252-7510.

<http://www.raduga-print.ru>

<http://www.radugaprint.ru>