

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ “МЭИ”
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
АССОЦИАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОТДЕЛОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ (АМО)
РОССИЙСКО-КИРГИЗСКИЙ КОНСОРЦИУМ ТЕХНИЧЕСКИХ
УНИВЕРСИТЕТОВ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

2 - 3 марта 2017 г.
МОСКВА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ТОМ
3



МОСКВА

Издательский дом МЭИ

2017

УДК 621.3+621.37[(043.2)]

Р 154

Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 17-38-10024-мол_г

Р 154 Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2—3 марта 2017 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. — 448 с.

ISBN 978-5-383-01077-8

ISBN 978-5-383-01080-8 (Том 3)

Помещенные в третьем томе сборника тезисы докладов студентов и аспирантов российских и зарубежных вузов освещают основные направления современной ядерной энергетики и теплофизики.

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.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Роголёв Н.Д. — ректор, председатель Оргкомитета

В.К. Драгунов — проректор по научной работе, сопредседатель

Т.А. Степанова — проректор по учебной работе, сопредседатель

Е.В. Бычкова — научный сотрудник кафедры АЭП, ответственный секретарь

С.А. Цырук — помощник проректора по научной работе

А.Е. Тарасов — начальник отдела международных связей

С.А. Грузков — директор ИЭТ

И.Н. Мирошникова — директор ИРЭ

А.В. Дедов — директор ИТАЭ

П.А. Бутырин — директор ИЭЭ

В.П. Лунин — директор АВТИ

С.А. Серков — директор ЭнМИ

С.В. Захаров — директор ИПЭЭф

А.Ю. Невский — директор ИнЭИ

А.С. Федулов — директор филиала МЭИ в г. Смоленске

М.М. Султанов — директор филиала МЭИ в г. Волжский

С.А. Абдулкеримов — директор филиала МЭИ в г. Душанбе

Н.И. Файрушин — директор Энергетического колледжа (филиал МЭИ)
в г. Конаково

ISBN 978-5-383-01077-8

ISBN 978-5-383-01080-8 (Том 3)

© Авторы, 2017

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017

Направление
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
И ТЕПЛОФИЗИКА

Научный руководитель направления —
директор ИТАЭ, д.т.н.,
профессор А.В. Дедов

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И УСТАНОВКИ

*Председатель секции — д.ф.-м.н., профессор О.И. Мелихов
Секретарь секции — вед. инженер Р.Х. Хасанов*

*Ю.В. Бондаренко, студ.; рук. С.И. Рясный, д.т.н., проф.;
конс. А.В. Щугорев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

ВЫБОР ГРАНИЦ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОМ ПОДТВЕРЖДЕНИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОПОРНО- ПОДВЕСНОЙ СИСТЕМЫ

Расчетно-экспериментальное обоснование сейсмостойкости оборудования в реальных условиях монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки включает в себя натурное определение значений собственных частот и декрементов колебаний и перерасчеты сейсмостойкости с учетом этих значений.

Для оптимизации процедуры расчета, являющейся наиболее трудоемкой составной частью общей процедуры оценки сейсмостойкости, предложены варианты геометрического упрощения расчетной схемы путем обоснованного выбора ее границ, что особенно актуально для разветвленных трубопроводных схем технологических систем АЭС с реактором БН-800.

Разветвленность трубопроводов на Белоярской АЭС обусловлена более высокой рабочей температурой (по сравнению с АЭС с реакторами ВВЭР-1000) и, соответственно, необходимостью компенсации более высоких температурных расширений, при которой жесткие опоры трубопроводов устанавливаются на значительных расстояниях друг от друга.

Увеличение протяженности трубопровода и усложнение его геометрии вызывают появление собственных форм колебаний с частотами, не определяемыми расчетно-экспериментальным методом, что приводит как к

усложнению исследований динамических характеристик, так и к необходимости разработки особых подходов к выбору границ расчетных схем.

В данной работе в качестве основной принята расчетная схема, ограниченная жесткими опорами и соединениями, обладающими существенно большей жесткостью по сравнению с исследуемым участком. Для основной схемы расчетами определены собственные частоты, произведено их сопоставление с полученными экспериментальными данными, выполнен расчет на сейсмостойкость.

Рассмотрены различные варианты изменения (уменьшения) границ расчетной схемы. Результаты расчета на сейсмостойкость, а также собственные частоты, полученные для упрощенных случаев, сопоставлены с результатами расчетов для основной схемы. Сделаны выводы о наиболее корректном способе упрощения расчетной схемы.

ОПТИМИЗАЦИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПОРОВ В ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В [1] опубликована методика оптимизации температурных напоров в подогревателях системы регенерации ПТУ, результаты которой могут быть использованы значительно позже их получения. В качестве примера выполнена оптимизация температурных напоров в регенеративных подогревателях ПТУ с турбиной К-1200-6.8/50. Все подогреватели этой ПТУ без пароохладителей.

В данной работе предполагается использовать предлагаемую в [1] методику для подогревателей с зоной охлаждения пара (ОП). При изменении минимального температурного напора в зонах конденсации пара (КП) δt изменятся поверхности нагрева всех трех зон (ОП, КП и ОК — охлаждения конденсата) подогревателя. Критерий оптимальности получен в виде

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{год}} = & (p + E_{\text{к}}) \sum_{i=1}^n \Delta c_{\text{уд}i} \left[\frac{c_{pi}}{k_{\text{кп}i}} G_{\text{в}i}(\delta t) \ln \left(\frac{t_{\text{с}i} - t_{\text{кп}i}^{\text{вх}}(\delta t)}{\delta t_i} \right) + \right. \\ & + \frac{c_{pi}}{k_{\text{ок}i}} \frac{t_{\text{кп}i}^{\text{вх}} - t_{\text{в}i}^{\text{вх}}(\delta t)}{t_{\text{с}i} - t_{\text{кп}i}^{\text{вх}}(\delta t) - \delta t_{\text{ок}i}} G_{\text{в}i}(\delta t) \ln \left(\frac{t_{\text{с}i} - t_{\text{кп}i}^{\text{вх}}(\delta t)}{\delta t_{\text{ок}i}} \right) + \\ & \left. + \frac{c_{pi}}{k_{\text{оп}i}} \frac{t_{\text{кп}i}^{\text{вх}} - t_{\text{в}i}^{\text{вх}}(\delta t)}{t_{\text{п}i}^{\text{вх}}(\delta t) - t_{\text{в}i}^{\text{вх}}(\delta t) - \delta t_{\text{кп}i} - \delta t_{\text{ост}i}} G_{\text{в}i}(\delta t) \ln \left(\frac{t_{\text{п}i}^{\text{вх}} - t_{\text{п}i}(\delta t)}{\delta t_{\text{ост}i} + \delta t_{\text{кп}i}} \right) - F_{i\text{баз}} \right] - \\ & - z^3 \tau_{\text{уст}} \left[N_{\text{э}}(\delta t) - N_{\text{э}\text{ баз}} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $Q_{\text{кп}i}$, $Q_{\text{ок}i}$, $Q_{\text{оп}i}$ — тепловые мощности зон КП, ОК и ОП; $G_{\text{в}i}$ — расход нагреваемой воды в i -ом подогревателе; $k_{\text{кп}i}$, $k_{\text{ок}i}$, $k_{\text{оп}i}$ — коэффициенты теплопередачи в зонах КП, ОК и ОП. По сравнению с критерием в [1] в новый критерий вошли такие характеристики подогревателей как остаточный (после зоны ОП) перегрев пара $t_{\text{ост}}$, гидравлическое сопротивление $\Delta p_{\text{оп}}$ и коэффициент теплоотдачи в зоне ОП.

Особенностью расчета тепловой схемы ПТУ при решении данной задачи является необходимость решения для подогревателя с зоной ОП не одного, а двух уравнений теплового баланса: одно для зон КП и ОК, второе для зоны ОП или для всего подогревателя.

Литература

1. Шамароков А.С., Зорин В.М., Фам Куанг Дай. Оптимизация минимальных температурных напоров в подогревателях системы регенерации паротурбинной установки // Теплоэнергетика. 2016. № 3.

Н.С. Вододохов, студ.; рук. Ю.Б. Воробьёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВС РЕАКТОРА ПИК

Высокопоточный исследовательский реактор ПИК относится к установкам стационарного типа и предназначен для исследований в области физики конденсированного состояния, ядерной физики и физики слабых взаимодействий, структурной и радиационной биологии и биофизики, радиационной физики и химии, а также для решения многих прикладных технических задач.

Реактор ПИК отличается от большинства аналогичных зарубежных проектов увеличенными нейтронными потоками в отражателе, наличием нейтронной ловушки с очень высоким потоком и возможностью облучения материалов в активной зоне. Максимальная плотность невозмущенного потока тепловых нейтронов близка к величине $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В настоящей работе исследуется тепломассообмен в пучке стержней РУ ПИК. Данные исследования необходимы для того чтобы получить представление о теплогидравлических процессах, происходящих в ТВС при работе реактора, выявить возможные зоны подкипания. В рамках данной работы используются методы вычислительной гидродинамики (CFD). На основе результатов LES-расчетов (LES — метод моделирования крупных вихрей), проведенных вследствие отсутствия реальных опытов на ТВС РУ ПИК, определена RANS-модель (RANS — метод использующий уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу) и схема дискретизации, способная с высокой точностью моделировать теплогидравлические характеристики ТВС. Оценена размерность сетки CFD-модели ТВС.

СИМУЛЯЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПУСКА И ОСТАНОВА НА ТРЕНАЖЕРЕ ЭНЕРГБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000

Характер эксплуатации современных атомных электростанций таков, что оператор может годами не участвовать в пуске и останове блока. Отработка действий оперативного персонала в этих режимах производится при помощи тренажеров и в программах подготовки занимает значительную долю практических занятий в части режимов нормальной эксплуатации. Процедуры пуска и останова наилучшим образом подходят для тренировки навыков по анализу ситуации и выработке управляющих решений в различных режимах работы не только реакторной установки, но и большинства систем энергоблока и входящего в их состав оборудования. Целесообразным представляется освоение данных режимов и в вузовской подготовке специалистов для АЭС.

В качестве учебной задачи для аналитического и полномасштабного тренажеров энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000, которыми располагает Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ), разработана методика симуляции останова энергоблока с переводом реакторной установки в «горячее» состояние и пуска из достигнутого состояния с выводом на энергетический уровень мощности. Симуляция производится на основе адаптированной типовой пошаговой программы пуска-останова с учетом базового перечня операций, порядка и последовательности их выполнения для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000.

Методические рекомендации для обучаемых [1] содержат описание действий, которые необходимо выполнить на тренажере. Они предполагают воздействия на имитируемые органы управления, а также взаимодействие с органами контроля. Помимо этого приводятся наименование требуемых органов и номера панелей и пультов, на которых они расположены. Симуляция предполагает также снятие и анализ зависимостей во времени основных параметров энергоблока, набор которых может меняться на разных этапах пускоостановочных работ.

Разработанная для тренажеров методика симуляции технологических процессов пуска и останова моделируемого ими энергоблока является частью обучающего комплекса, внедренного в ИГЭУ и позволяющего сократить сроки адаптации выпускников на рабочих местах на АЭС.

Литература

1. **Вольман М.А.** Пуск и останов энергоблока ВВЭР-1000: методические материалы для проведения лабораторного практикума. Иваново: Б.и., 2014. 60 с.

А.Д. Гречаник, асп.; рук-ли: А.А. Ситников, д.т.н., проф. (АлГТУ, Барнаул); М.К. Скаков, д.ф.-м.н., проф. (ИАЭ, Курчатов, Казахстан)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ ВОДО-ВОДЯНОГО РЕАКТОРА

Аварии, произошедшие за последние десятилетия на АЭС стали практическим подтверждением того, что вероятность тяжелых аварий на АЭС не так уж мала [1, 2]. Поэтому всестороннее изучение аварийных ситуаций на АЭС и разработка способов устранения аварийных последствий является актуальной задачей.

При аварии на водо-водяном реакторе АЭС “Fukushima-1” ядерное топливо было расплавлено из-за прекращения функционирования всех систем охлаждения реактора. Образовавшийся в результате аварии кориум перемещался и мог затвердевать в различных областях реакторной установки. Одной из задач, которую необходимо решить для ликвидации последствий этой аварии, является удаление затвердевшего кориума из корпуса реактора и контейнмента АЭС. Основной проблемой при решении этой задачи является отсутствие достоверных данных о состоянии и свойствах затвердевшего кориума, что затрудняет разработку и создание инструментов для его удаления.

Для решения этой проблемы в ИАЭ НЯЦ РК проводятся маломасштабные и крупномасштабные экспериментальные исследования с имитатором расплава активной зоны водо-водяных реакторов.

Суть маломасштабных и крупномасштабных экспериментов состоит в получении расплава композиции материалов, которые присутствуют в активной зоне водо-водяного реактора (UO_2 , Zr, V_4C), и обеспечении взаимодействия этого расплава с конструкционными материалами ядерного реактора. Плавление данной композиции материалов как в маломасштабных, так и в крупномасштабных экспериментах осуществляется методом индукционного нагрева.

Проводимые экспериментальные исследования позволят изучить свойства затвердевших фрагментов имитатора расплава активной зоны и получить данные, необходимые для создания методики извлечения и переработки реальных затвердевших фрагментов расплава активной зоны аварийного реактора. Полученные в результате экспериментов данные также необходимы для прогнозирования возможных вариантов развития тяжелой аварии на водо-водяном реакторе.

Литература

1. Proc. of the First Int. Information Meeting on the TMI-2 Accident. (Germantown, MD), 1985.
2. Абагян А.А., Аршавский И.М., Дмитриев В.М. Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 4. С. 275—287.

Д.В. Гудеменко, асп.; рук. В.И. Мелихов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МИКРОВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

В статье представлены результаты численного моделирования развития волны термической детонации в системе «расплав кориума — пароводяная смесь» с использованием модели микровзаимодействий [1] для условий внекорпусного парового взрыва. Описана классическая схема протекания крупномасштабного парового взрыва. Приведена математическая модель термической детонации кода VAPEX-D [2].

С помощью кода VAPEX-D выполнено численное моделирование развития волны термической детонации в системе «расплав кориума — пароводяная смесь» с использованием модели микровзаимодействий для условий внекорпусного парового взрыва.

В расчетах получены как выход на стационарное распространение волны термической детонации, так и ее затухание в зависимости от величины объемной доли расплава кориума. С уменьшением начального объемного паросодержания уменьшается и минимальная объемная доля расплава при которой существует волна термической детонации. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что волна термической детонации может развиваться в весьма «бедных» смесях (объемные доли расплава 0,005—0,01). Несмотря на то, что возникающие давления относительно невелики (200—400 бар), однако их наличие может инициировать сильные паровые взрывы в областях, где объемная доля расплава кориума значительно выше (порядка 0.1) и соответственно развиваются гораздо большие динамические нагрузки на оборудование АЭС. Таким образом, необходимо проводить более тщательный анализ процессов, способных привести к термическому взаимодействию.

Литература

1. **The challenge** of modeling fuel–coolant interaction: Part II – Steam explosion / R. Meignen et al. // Nucl.Eng. Des. 2014.
2. **Мелихов О.И., Соколин А.В., Кузнецов В.Д.** Расчетный анализ взрывного взаимодействия кориума с водой // Теплоэнергетика. 2004. № 8.

*М.В. Запорожец, асп.; рук. К.Н. Проскуряков, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА LMS AMESIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР

С использованием пакета LMS Amesim [1] построена расчетная одномерная гидравлическая модель системы трубопроводов с подключенным компенсатором объема (КО). Нодализация схемы модели состоит из объектов следующих типов: трубопровод, узел, КО, источники объемного расхода и давления. Движение теплоносителя описывается системой уравнений Навье—Стокса в одномерной постановке, решение которой производится с использованием численной схемы Лакса—Вендроффа второго порядка точности [2]. В модели заданы реальные геометрические характеристики трубопроводов участка экспериментальной установки, созданной на базе котла № 3 ТЭЦ МЭИ, моделирующей работу петли главного циркуляционного контура АЭС с ВВЭР-440, а также термодинамические характеристики теплоносителя, соответствующие параметрам данной установки.

Для расчетных узлов модели получены временные реализации пульсации давления теплоносителя, а также их амплитудно-частотные характеристики для различных режимов: при постоянном расходе теплоносителя, его линейном и скачкообразном изменении. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, полученными на ТЭЦ МЭИ. Показано влияние КО на автоспектр пульсаций давления теплоносителя. Установлено, что акустические свойства КО близки к резонатору Гельмгольца [3].

Показано, что данную модель можно использовать для моделирования акустических колебаний в первом контуре АЭС с ВВЭР.

Литература

1. **Гимадиев А.Г.** LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014.
2. **Lax P.D., Wendroff B.** Systems of Conservation Laws.— Comms. Pure and Appl. Math. Vol. 13. P. 217—237.
3. **Исакович М.А.** Общая акустика: учебное пособие. М.: Наука, 1973.

А.Ш. Исхаков, асп.; рук. В.И. Мелихов, д.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ТЖМТ

Актуальность исследований теплофизических процессов, сопровождающих аварийный режим «межконтурная неплотность парогенератора» ядерных энергетических установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ), подтверждается несколькими факторами. Во-первых, это стремление в полной мере освоить новые ядерно-энергетические технологии, что невозможно без обоснования их безопасности [1, 2]. Во-вторых, сложность протекающих процессов вызывает интерес не только с точки зрения прикладных исследований, но и с точки зрения фундаментальной науки [3].

Авторами разработаны следующие численные модели вскипания капли воды высоких термодинамических параметров в ТЖМТ: «взрывная модель» [4], «интегральная термодинамически-равновесная модель» [5], «термодинамически-равновесная модель» для сферической, цилиндрической и плоской систем координат. Полученные результаты позволяют оценить динамическое воздействие на трубки парогенератора, находящиеся в непосредственной близости от места разрыва.

Помимо вскипания отдельных капель воды рассмотрена задача о расширении воды с непрерывным источником массы и энергии из разрыва. В свою очередь большая разница давлений в контурах реакторной установки с ТЖМТ обуславливает критический характер истечения воды в свинец. Критическое истечение недогретой до температуры насыщения и насыщенной воды является предметом отдельного исследования. В настоящей работе произведен анализ имеющихся экспериментальных данных, а также произведены верификационные расчеты моделей критического истечения теплогидравлического кода HYDRA разработки ИБРАЭ РАН.

Литература

1. **Зорин В.М.** Атомные электростанции. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Асмолов В.Г., Блинков В.Н., Ковалевич О.М.** Основы обеспечения безопасности АЭС: М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
3. **Dinh T.N.** Multiphase Flow Phenomena of Steam Generator Tube Rupture in a Lead-Cooled Reactor System: A Scoping Analysis // Proceedings of ICAPP 2007, Nice, France, May 13-18, 2007. Paper 7497.
4. **Исхаков А.Ш., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ртищев Н.А.** Анализ вскипания капли воды в жидком свинце // Теплофизика-2015: Тр. науч. техн. конф. Обнинск: АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2015.
5. **Исхаков А.Ш., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ртищев Н.А.** Моделирование вскипания капли воды в свинцовом теплоносителе // Теплофизика-2016: Тр. науч. техн. конф. Обнинск: АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2016.

Н.В. Ладанов, студ.; рук. В.И. Горбуров, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ФАЗ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖНОЙ ДЫРЧАТЫЙ ЛИСТ. РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ РАСЧЕТА ПДЛ

При разработке модели расчета гидродинамических характеристик кипящих погруженных поверхностей нагрева важное место следует уделять гидродинамике погруженных выравнивающих дырчатых листов (ПДЛ). Существующие методы расчета ПДЛ следует признать неудовлетворительными. Поиск таких важнейших характеристик как степень перфорации, глубина закраины, гидравлическое сопротивление ведутся эмпирически. Теория расчета ПДЛ практически не существует. Нет даже строгого определения «паровой подушки» под ПДЛ.

В нашей работе мы используем классический подход к ПДЛ, как к контуру естественной циркуляции (ЕЦ). Все сопротивление такого контура сосредоточено непосредственно на перфорированном листе. Рассматриваем плоскую задачу с равномерной раздачей пара под ПДЛ. В таком контуре ЕЦ возникает движущий напор за счет разности плотностей рабочей среды в опускном (между закраиной ПДЛ и корпусом парогенератора) в подъемном (под ПДЛ между закраинами) участками. Этот движущий напор следует приравнять гидравлическому сопротивлению ПДЛ и из этого равенства получить скорость циркуляции [1].

Всего существует шесть режимов циркуляции. Простейшим случаем циркуляции служит беззахватный режим течения в опускном участке (ОУ), когда скорость опускного движения меньше, чем скорость начала захвата пара. С ростом паропроизводительности увеличивается и скорость циркуляции, но до тех пор, пока скорость в ОУ не достигает захватной для пузырьковой фазы.

Согласно представлениям о физической картине течения рабочего тела через ПДЛ была составлена программа расчета гидродинамических параметров для ПЭВМ. Проведены вариантыные расчеты ПДЛ с изменением степени перфорации, сечения ОУ, глубины закраины, коэффициента гидравлического сопротивления.

Литература

1. **Горбуров В.И.** Гидродинамика двухфазных потоков в специфических условиях эксплуатации АЭС: учебное пособие / под ред. В.М. Зорина. М.: Издательство МЭИ, 1999. С. 113.

*Н.В. Ладанов, А.А. Корчагин, студенты;
рук. Ю.В. Парфенов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВТОРОГО КОНТУРА РЕАКТОРА БРЕСТ-ОД-300 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКА

БРЕСТ — разрабатываемый в данное время в России проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и закритическими параметрами пара.

При разработке, проектировании реактора необходимо знать все параметры как первого, так и второго контура, которые рассчитываются с помощью специальных математических моделей (программ), основанных на физических уравнениях, возможно, в графическом оформлении.

В нашей работе мы проводим расчеты второго контура энергоблока с установкой БРЕСТ-ОД-300 («опытный демонстрационный») с помощью программного обеспечения SimInTech, разработанного специально для этого реактора. Работа проводилась совместно с НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля непосредственно для дальнейшего анализа изменения параметров второго контура реактора в зависимости от режима работы реакторной установки (РУ).

Расчеты РУ БРЕСТ проводились для динамических и статических режимов. Режим считается динамическим, если изменение начальных параметров происходит непосредственно при нормальной работе РУ. Данные для статического режима задавались до запуска работы РУ. С помощью программного обеспечения удалось смоделировать не только режимы работы при различных уровнях мощности реактора, но также уделить внимание различным авариям, способам подключения и отключения того или иного оборудования. Были получены графические данные изменения параметров, с которыми удобнее проводить анализ, чем при работе с текстом. Электрическая мощность, давление в главном паровом коллекторе (ГПК), давление в конденсаторе, температура пара в ГПК, расходы в отборах турбины, давления в подогревателях высокого и низкого давления — вот лишь некоторые из параметров, которые отслеживались при запуске работы РУ.

Всего было рассчитано 10 статических и 8 динамических режимов работы энергоблока. Полученные данные подлежали сравнению с проектными данными, рассчитанными с помощью другого компьютерного «кода», моделирующего РУ БРЕСТ.

Ю.М. Лапин, студ.; рук. В.И. Мелихов, д.т.н. проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЭЖЕКТОРА С ПОМОЩЬЮ CFD КОДА

Безопасность на АЭС является задачей первостепенной важности. Для ее достижения еще на стадии проектирования в проект включаются системы безопасности, предназначенные для обеспечения критических функций безопасности, в том числе охлаждения активной зоны в аварийных ситуациях. В системе аварийного и плавного расхолаживания Нововоронежской АЭС-2 (проект АЭС-2006) будет использован агрегат «насос-эжектор».

В проекте «АЭС-2006» в системе аварийного и плавного расхолаживания первого контура реакторной установки планируется использовать агрегат «насос-эжектор», который представляет собой соединение насоса высокого давления и водо-водяного эжектора, устанавливаемого на напорной стороне насоса.

В системе плавного и аварийного расхолаживания первого контура реакторной установки этот агрегат должен обеспечивать подачу требуемого расхода воды в первый контур к конечному поглотителю (технической воде). В режимах нормальной эксплуатации система должна обеспечивать отвод тепла от бассейна выдержки отработанного топлива и плановое расхолаживание первого контура.

Для обоснования возможностей использования агрегата «насос-эжектор» в проекте «АЭС-2006» необходимо экспериментальное подтверждение его работоспособности, в первую очередь определение его расходно-напорной характеристики.

Для анализа возникающих процессов используются трехмерные расчетные коды CFD (ComputationFluidDynamics), позволяющие выполнить анализ гидродинамических процессов.

ОБОБЩЕННЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР-1000

Обобщенный термодинамический анализ (ОТДА) позволяет дать строгое решение задачи определения управляемых координат сложного объекта. Это даст возможность найти новые сигналы, не используемые в типовых АСР, и получить технические решения, повышающие точность и качество регулирования. Задача теоретического обоснования управляемых координат рассматриваемого объекта для совершенствования АСР питания парогенератора является актуальной как в научном, так и в практическом аспектах [1].

В результате проведения ОТДА теоретически обосновано известное техническое решение по регулированию уровня в парогенераторе. Составлен обобщенный потоковый граф (рис. 1) и выделены основные работы, совершаемые в парогенераторе — 18 обобщенных работ. Некоторые параметры парогенератора можно представить в виде обобщенных зарядов (комплексированных сигналов) [2].

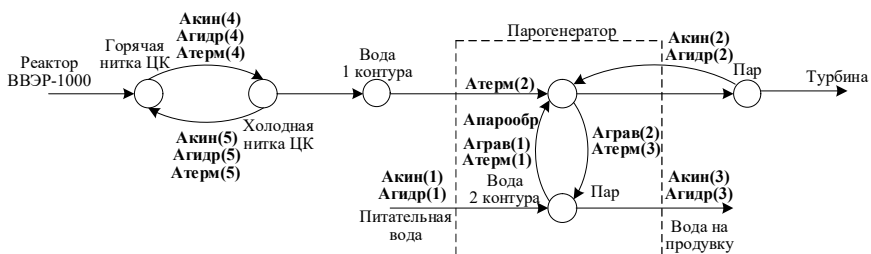


Рис. 1. Потоковый граф для системы питания парогенератора с отображением работ

Результат ОТДА показал, что обобщенные заряды по своему параметрическому составу и численному значению отличаются от сигналов, используемых в системе питания парогенератора. Установлено, что типовые сигналы не отражают в полной мере свойства процесса и обосновываются только необходимостью поддержания материального баланса. Необходима экспериментальная проверка полученных комплексированных сигналов в сравнении с типовой схемой регулирования. Для этого нужно разработать нелинейную математическую модель парогенератора энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Литература

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. Кн. 2. Проектирование / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского. Иваново: ИГЭУ, 2013. 436 с.
2. **Вейник А.И.** Термодинамика. Минск: Высшая школа, 1965. 404 с.

А.Ю. Павлихин, студ.; рук. Ю.Б. Воробьёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОДНОМЕРНОГО КОДА RELAP5 С ТРЕХМЕРНЫМ КОДОМ CFD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С РАЗРЫВОМ ПАРОПРОВОДА ПАРОГЕНЕРАТОРА

В настоящее время для моделирования теплогидравлических процессов в анализе безопасности АЭС широко используются интегральные коды типа RELAP5, которые позволяют адекватно отобразить одно- и двухфазные потоки в стационарных и нестационарных условиях. Они обладают надежной предсказательной силой, основанной на большом количестве экспериментальных данных, а также позволяют получать решение за приемлемое время. Интегральные методы способны адекватно проводить макромасштабное моделирование поведения всей системы. Но вследствие одномерного приближения системного кода невозможно получить достоверное решение ряда задач по прогнозированию аварийных ситуаций.

На сегодня имеет место тенденция более широкого использования вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования теплогидравлических процессов. CFD коды позволяют обеспечить решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS) в двух- и трехмерных приближениях. При этом моделируемые процессы часто не могут быть адекватно представлены с использованием традиционных одномерных системных кодов типа RELAP5. Однако CFD коды ресурсозатратны, что является причиной использования их для моделирования чаще отдельных элементов и использования одномерных системных кодов для подготовки граничных условий. Поэтому является разумным рассмотреть процесс объединения кодов разного типа — CFD и системного типа RELAP5.

В докладе рассматриваются результаты работ по соединению трехмерного CFD кода с исполняемой программой, которая обеспечивает обмен данными с одномерным кодом, например, RELAP5. Также представлены концепция, основные достоинства и возможности предлагаемого метода, результаты расчетов, демонстрирующие функциональные возможности разрабатываемой системы. Расчеты основываются на гипотетической аварии разрыва паропровода ПГ РУ ВВЭР-1000/В320 и связанным с этим процессом возможным захлаживанием теплоносителя первого контура по одной петле. В докладе рассматриваются варианты моделирования аварии на основе кода RELAP5 и с использованием связи RELAP5 с CFD кодом.

Данный подход приводит к более рациональному использованию вычислительных ресурсов и возможности получения более точных решений в анализе безопасности АЭС.

В.Н. Подгорный, студ.; рук. Ю.Б. Воробьёв, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ НА АЭС С ПОМОЩЬЮ CFD КОДОВ

В современной атомной энергетике немалую роль играет пожарная безопасность на производстве. Возникновение пожара может привести к совершенно различным последствиям и повреждениям. От обычного, кратковременного возгорания с повреждениями малой части имущества станции до аварий с выбросами радиоактивности в атмосферу. К примеру, в 1957 году в Великобритании произошел пожар, охвативший 8 тонн уранового топлива, в результате произошло расплавление активной зоны реактора и выброс радиоактивности в атмосферу. Эта авария получила 5-й уровень опасности аварии по шкале INES (Международная шкала ядерных событий).

Мировая статистика пожаров на АЭС свидетельствует, что объектами пожаров чаще всего становятся генераторы, кабельные каналы, электрооборудование, насосные установки. Также потенциальными источниками возгорания являются механизмы и системы, в которых используются легковоспламеняющиеся вещества, примером может являться турбина АЭС.

Проведение серии экспериментов для изучения поведения возгорания и прогнозов последствий его несвоевременного устранения является дорогостоящим. Поэтому предпочтение отдается компьютерным кодам.

Современные компьютерные коды, такие как FDS, CFX, FLUENT позволяют получить достаточно близкие значения температур при моделировании возгораний в помещениях, понять механизмы его развития, оптимизировать конструкцию АЭС и разрабатывать пути пожаротушения для повышения эффективности пожарной безопасности на ядерных объектах.

В работе представляются результаты моделирования на CFD коде пожаров типичных для АЭС. Производится сравнение с уже имеющимися экспериментальными данными и с результатами попыток моделирования на других кодах. Также рассматриваются результаты корректировок моделей в соответствии с изменениями использованных теплогидравлических моделей, различным моделированием химических реакций, происходящих в процессе горения, и моделями турбулентности воздушных потоков.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС С ВВЭР-440

Практика эксплуатации АЭС показывает, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов [1]. Эти процессы относятся к числу главных факторов, определяющих динамические нагрузки на оборудование, его срок службы и надежность. Наиболее опасно взаимодействие оборудования с потоком текучей среды в резонансной области колебаний механических элементов и потока. Экспериментальные данные по колебаниям давления в проточной части ВВЭР-440, полученные в ходе стендовых испытаний на моделях и при натурных измерениях, позволяют выделить два основных типа гидродинамических возмущений потока теплоносителя: один происходит на оборотной частоте ГЦН ее гармониках и субгармониках, а другой связан с наличием акустических стоячих волн (АСВ). Акустические схемы первого контура и компенсатора давления (КД) разработаны на основе геометрических характеристик 3-4 энергоблоков Нововоронежской АЭС с ВВЭР 440. Для расчета собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) [2] определены акустические параметры: акустическая масса, акустическая податливость, а также скорость распространения звука с учетом деформаций труб и сжимаемости воды.

СЧКДТ, обусловленные колебаниями парового и водяного объемов КД, сопоставлены с результатами измерений автоспектральных плотностей мощности сигналов от датчиков пульсаций давления (ДПД), полученных на 3-4 блоках АЭС с ВВЭР 440. В холодном состоянии СЧКДТ компенсатора объема изменяется в диапазоне от (1,3 – 2,2 Гц). Такая частота может резонировать с вибрациями тепловыделяющих сборок (ТВС). Увеличение толщины азотной подушки, может привести к резонансу собственной частоты колебания давления азота с колебаниями корпуса реактора или шахты. В горячем состоянии опасным для возникновения условия резонанса является режим, при котором АСВ, обусловленная колебаниями парового объема, равняется частоте колебаний шахты реактора – 14,2 Гц. Чтобы избежать возникновения этого резонанса, необходимо поддерживать безопасный уровень воды в КД.

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. М.: МЭИ, 1984.

А.С. Сураев, докторант (ГУ им. Шакарима, г. Семей); В.М. Котов, Н.А. Сулейменов, соискатели (ИАЭ РГП НЯЦ РК, г. Курчатов); рук. М.К. Скаков, д.ф.-м.н., проф. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)

ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Цель работ – отработка процесса получения и перегрева пара в едином контуре. Исследование выполняется в рамках грантового финансируемого проекта «АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем».

В рассматриваемой демонстрационной установке осуществляются процессы подогрева воды, парообразования и перегрева пара, происходящие в схеме АЭС на основе газоохлаждаемого реактора [3].

Работы по данной тематике проводятся в два этапа. На начальном этапе работ были проведены расчетные исследования, полученные результаты, отражены в работах [1,2]. Выполнена сборка установки, отладка информационно-управляющей системы, пуско-наладочные работы, отработана методика проведения экспериментов и произведена проверка работоспособности установки.

Второй этап заключается в проведении методических экспериментов, конечным результатом которых является отработка режимов и методов работы на установке.

Полученные в ходе эксперимента результаты позволят разработать рекомендации для дальнейших работ по исследованию процесса перегрева пара.

Литература

1. Сураев А.С., Котов В.М., Скаков М.К. и др. Исследование парообразования и перегрева пара в тонкостенных теплообменных трубах // Вестник НЯЦ РК, 2016. Вып. 1. С. 73—76.
2. Исследование характеристик теплообменных трубок АЭС в условиях интенсивного парообразования и перегрева пара / А.С. Сураев, В.М. Котов, В.А. Витюк, Н.А. Сулейменов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции, 1—3 июня 2016. Томск, 2016. С. 57—58.
3. Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водным замедлителем // Атомная энергия. 2014. Т.116. Вып. 1. С. 6—10.

ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБОК (ТОТ) ПО УСЛОВИЯМ УСТАЛОСТИ И КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ (КР)

Одна из проблем при эксплуатации АЭС – это повреждение элементов ПГ, в том числе теплообменных труб (ТОТ). В качестве теплообменной поверхности — трубы из нержавеющей стали аустенитного класса 08X18H10T. Методика оценки времени до первого коррозионного растрескивания с помощью пользования номограммой создает определенные трудности, т.е. расчеты занимают много времени, точность расчетов является недостаточной. Поэтому предлагается программа расчета на языке FORTRAN-IV. Методика наработки до первого отказа пучка теплообменных трубок τ определяется из системы уравнений [1]:

$$\begin{aligned}\tau_E &= 0,707\sigma - 0,01796\sqrt{\rho}; \quad \tau_p = 0,3593\sqrt{\rho}; \\ K &= \ln \left(\exp \left(\frac{157,48 - 7,243\tau_E}{T} \right) + \exp \left(\frac{157,48 - 7,24(\tau_p + \sigma)}{T} \right) \right) - 17,79; \\ \tau &= \exp(\ln L + K - 1,5 \ln(C_{Cl^-}) - 0,5 \ln(C_{O_2})),\end{aligned}$$

где σ — действующее касательное напряжение; ρ — плотность дислокаций в металле; K — промежуточная величина, являющаяся функцией от σ ; ρ , T , τ_E — эффективное касательное напряжение; τ_p — напряжение, вызываемое скоплением дислокаций; L — толщина образца; C_{O_2} — концентрация кислорода; C_{Cl^-} — концентрация хлорид-иона.

Разработанные методы и полученные результаты использованы для прогноза запаса парогенератора до первого отказа и исследования динамики накопления дефектных ТОТ. Также одновременно необходимо исследовать методы для повышения надежности ПГ, а также увеличения срока службы ПГ.

Литература

1. Горбатов В.П. Локальная коррозия металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат. 1992.

Р.С. Шуклин, студ.; рук. К.Н. Проскураков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС-2006

В настоящее время на энергоблоках АЭС с реакторами ВВЭР измерены вибрации внутрикорпусных устройств (ВКУ) и тепловыделяющих сборок (ТВС) и определены некоторые частоты характерных акустических стоячих волн (АСВ) в теплоносителе в номинальном режиме. Однако, этих данных недостаточно для прогнозирования резонансов вибраций оборудования с упругими волнами теплоносителя в режимах предусмотренных технологическими регламентами эксплуатации энергоблока. Поскольку компенсатор давления (КД) является резонатором Гельмгольца, расчеты АСВ генерируемые им проведены по известным методикам. Акустическая модель КД имеет два участка: участок, содержащий воду и участок, содержащий пар. Для расчета собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) определены значения следующих акустических параметров: акустической массы и податливости, скорости распространения звука с учетом деформаций труб и сжимаемости воды и пара. Получены результаты оценки СЧКДТ в зависимости от давления и температуры сред в КД АЭС 2006, в исследованных эксплуатационных режимах и при различных уровнях воды. Рассчитанные частоты находятся в диапазоне от 0,19 до 18,04 Гц. Результаты расчета СЧКДТ указывают на то, что в элементах оборудования АЭС в исследованных режимах могут возникать резонансы АСВ с вибрациями оборудования, поскольку частота АСВ совпадает с частотами вибраций приведенных в [1]. Согласно этим данным для серийных блоков ВВЭР-1000 частоты АСВ составляют ряд ~0,6; 6,8; 9,3; 13,2; 15,5; 20,0 Гц и зависят главным образом от теплогидравлических параметров сред в КД, где: $f_1 = 0,6$ Гц — СЧКДТ КД в номинальном режиме, $f_2 = 6,8$ Гц — 1-я петлевая АСВ в петлях, $f_3 = 9,3$ Гц — 1-я корпусная АСВ, $f_4 = 13,2$ Гц — 2-я корпусная АСВ.

Полученные результаты могут найти применение для совершенствования эксплуатации энергоблоков АЭС – 2006, а также на стадии проектирования и конструирования нового поколения АЭС для обоснования целостности их конструкций и основного оборудования на срок службы до 60—80 лет.

Литература

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004.

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Председатель секции — зав. каф. ОФЯС, д.т.н.,
профессор А.В. Дедов

Секретарь секции — д.т.н., профессор А.В. Лубенченко

Е.А. Авдоница, студ.; Ю.В. Сморгочкова, асп.;
рук. А.В. Дедов, д.т.н., член-корр. РАН (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В последнее время все более актуальной становится проблема повышения энергоэффективности и безопасности ядерных энергетических установок. Одним из путей решения этой проблемы является использование тепловыделяющих сборок с микротвэлами, непосредственно охлаждаемых однофазным или двухфазным теплоносителем. Такие ТВС обладают рядом существенных преимуществ по сравнению со сборками из стержневых твэлов [1]. В такой сборке микротвэлы размещаются между перфорированными чехлами. Для минимизации потерь давления реализовано радиальное течение теплоносителя.

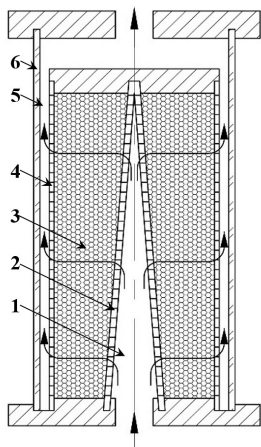


Рис. 1. Схема рабочего участка

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики и теплообмена в модели ТВС МТ с радиальным течением теплоносителя в широком диапазоне режимных параметров. Схема рабочего участка (РУ) представлена на рис. 1. Теплоноситель (дистиллированная вода) подается в раздаточный коллектор (1), затем проходит через внутренний перфорированный чехол (2), омывает шаровую засыпку (3) и через внешний перфорированный чехол (4) выходит

в сборный коллектор (5). Шаровая засыпка, моделирующая микротвэлы состоит из стальных шариков диаметром 2,0 мм. Внутреннее тепловыделение моделируется с помощью нагрева шаровой засыпки токами высокой частоты.

Стенд рассчитан на температуру в контуре от 20 до 180 °С, давление до 1,0 МПа, расход теплоносителя (0,01—0,50) кг/с.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 15-08-08255.

Литература

1. **Перспективы** развития микротвэлов в ВВЭР / Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин, А.А. Хрулёв и др. // Атомная энергия. 1999. Т. 86. № 6. С. 443—449.

Ю.Н. Андриянова, А.С. Грязев, аспиранты;
рук. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Задачи определения послойных профилей образцов представляют интерес во многих областях: взаимодействие термоядерной плазмы с обращенными к ней материалами, микро- и нанозлектроника. В работе проведен анализ образцов, используя спектроскопию отраженных электронов (СОЭ). Основной интерес в работе сосредоточен на описании спектра в области потерь энергии 0-2000 эВ. Целью настоящей работы является построение универсальной методики определения послойных профилей на основе СОЭ. Данная задача является обратной задачей матфизики и решается многократным решением прямой задачи, где толщины слоев являются варьируемыми параметрами. Расчет спектров выполняется на основе численного решения [1] уравнения переноса электронов в веществе, позволяющего провести вычисления с высокой точностью. В работе из экспериментальных спектров СОЭ однородных образцов восстановлены дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов, которые использовались для расчета спектров от слоисто-неоднородных структур.

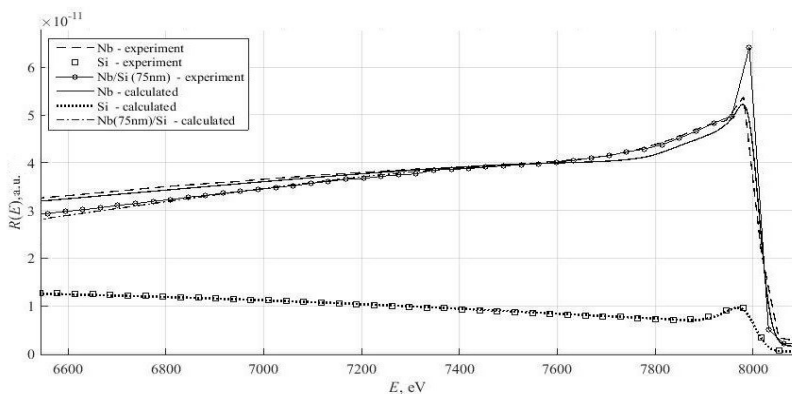


Рис. 1. Сравнение экспериментальных [2] и расчетных энергетических спектров электронов, отраженных от однородных мишеней Nb и Si и от слоисто-неоднородной мишени Nb/Si. Энергия зондирующего пучка – 8 кэВ

Литература

1. Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2016. Vol. 210. P. 16—29.
2. Афанасьев В.П., Лубенченко А.В., Федорович С.Д., Павлоцкий А.Б. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. № 11. С. 100—108.

А.Е. Евтюшина, студ;
рук. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОСТРОЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ «КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ» В РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В данной работе сравниваются транспортное и малоугловое приближения, применяемые для интерпретации рентгеновских фотоэлектронных спектров (РФЭС), с другими методами и определяются «корректирующие коэффициенты».

В работе было получено, что транспортное приближение, основанное на аппроксимационной формуле [1], удовлетворительно соответствует зависимости, полученной на основе точного численного решения с использованием транспортного сечения. Погрешность аппроксимационной формулы зависит от угла рассеяния и может достигать 20 % для $Z > 30$, а для легких элементов превышает 50 % для определенных углов рассеяния. Малоугловое приближение хорошо работает для легких элементов ($Z < 30$) и хуже для тяжелых элементов. Наибольшее отличие результатов малоуглового приближения от точных значений наблюдается в случае, когда атомный номер мишени $Z > 40$. Для повышения точности описания РФЭС сигнала в малоугловом приближении вводится «корректирующий коэффициент» позволяющий получить 90 % совпадение точного решения с малоугловым приближением для «magicangle».

Литература

1. Powell C.J., Jablonsky A. // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. 2010. Vol. 178—179. P. 331.

*В.Д. Жакетов, асп. (НИУ «МЭИ»);
рук. Ю.В. Никитенко, д.ф.-м.н. (ОИЯИ, г. Дубна)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА И СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СЛОИСТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ МЕТОДОМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Говоря о магнитном поведении сверхпроводников (S) и ферромагнетиков (FM), можно сказать, что их поведение противоположно. В ферромагнетик магнитное поле свободно проникает, в то время как сверхпроводник стремится его полностью вытеснить, компенсируя поверхностными токами. Но возможно организовать искусственный контакт этих двух фаз, например напылив чередующиеся слои S/FM. И при условии, что толщины этих слоев порядка корреляционной длины сверхпроводимости, возможно взаимное проникновение как сверхпроводимости в ферромагнитный слой, так и обратное. При этом предсказывается модификация доменной структуры ферромагнитного слоя, проявляющиеся в уменьшении характерного размера домена под воздействием сверхпроводимости на несколько порядков. Это явление известно как криптоферромагнетизм. Единственной методикой, позволяющей напрямую зарегистрировать описанный физический эффект, является рефлектометрия поляризованных нейтронов. Малоугловое рассеяние и дифракция в плоскости перпендикулярной плоскости отраженного пучка может дать информацию о неоднородностях с характерным размером 1-1000 нм, что соответствует размеру криптоферромагнитных доменов.

В данной работе исследовались структуры с ферромагнитными слоями типа FeV, NiCu, Gd, контактирующие со сверхпроводящим слоем Nb. Исследования FeV структур показали, что в ферромагнитных слоях возникает магнитная решетка при температуре около 150 К, далее при переходе Nb в сверхпроводящее состояние при 8 К, сверхпроводимость модифицирует, сформированную магнитную решетку, при этом уменьшается период решетки и размер домена, который соответствует предсказанному теоретически характерному размеру криптоферромагнитного домена. Рассеяние нейтронов, регистрируемое детектором, на NiCu структурах показало переход при $T = 5$ К, одна из гипотез — что это аналогичное формирование криптоферромагнитных доменов. На образцах с Gd в качестве ферромагнитных слоев обнаружено падение спиновой асимметрии отраженного поляризованного пучка нейтронов при температуре ниже T_c ниобия, что также является косвенным указанием на формирование криптоферромагнитных доменов.

В.В. Ильин, студ.; рук. А.Т. Комов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ

Повышение энергонапряженности теплопередающих устройств и реакторных установок (РУ) современных АЭС определяет использование средств интенсификации теплосъема.

Известно большое число методов интенсификации теплообмена [1]. Наиболее распространенные методы интенсификации теплосъема – турбулизация и закрутка потока [2].

Одним из способов оценки процессов происходящих в кольцевом канале, является эксперимент по визуализации течения в трубе.

Однако для более точной и быстрой оценки процессов использовалось численное моделирование. ANSYS Fluent позволяет рассчитывать любую геометрию при любых условиях, выводя расчет на более широкий уровень.

В частном случае течения в кольцевом канале при наличии интенсификаторов можно оценить место, масштаб и величину зарождающихся вихрей.

Градиент скорости рабочей жидкости представлен на рис. 1.

Прорабатывается методика экспериментальной оценки процессов происходящих в кольцевом канале, для сравнения их с численным моделированием.

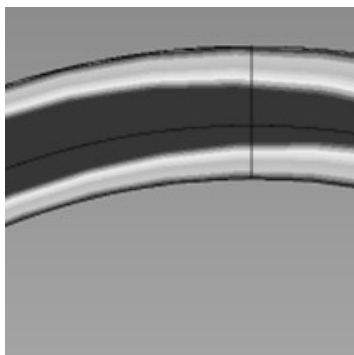


Рис. 1. Градиент скорости рабочей жидкости в кольцевом канале

Литература

1. **Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Яхро С.А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1981.
2. **Щукин В.К.** Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980.

А.А. Кадыргулов, студ. (НИУ «МЭИ»);
рук. А.В. Сушков (НИЦ «Курчатовский институт»)

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗОЛИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ

Изолирующие усилители (ИУ) представляют собой специальный тип усилителей, которые обеспечивают полную изоляцию между входным и выходным сигналом. Изолирующие свойства достигаются за счет трансформаторной или оптической связи входного сигнала с выходным, при этом обеспечивается изоляция до 7,5 кВ. ИУ с трансформаторной связью имеют хорошую линейность, но довольно узкую полосу пропускания (ПП) 0—120 кГц. Усилители с оптической связью могут обеспечить ПП свыше 1 МГц, но уступают в линейности усилителям с трансформаторной связью.

Изолирующие усилители широко применяются в диагностике плазмы на токамаках. Применение ИУ позволяет повысить помехоустойчивость диагностики, а также обеспечивает защиту дорогостоящей регистрирующей аппаратуры от повреждений в результате попадания аварийного напряжения до 3 кВ на элементы конструкции токамака.

В настоящее время на токамаке Т-10 используются ИУ с ПП 0—120 кГц. Эта полоса пропускания недостаточна для проектируемых диагностик токамака Т-15. В частности, на таких диагностиках, как магнитные зонды или зонды Ленгмюра предполагается использовать АЦП с частотой дискретизации 2 МГц, что позволяет регистрировать сигналы с полосой до 1 МГц [1]. Поэтому необходимо иметь ИУ с ПП до 1 МГц.

Задача состояла в том, чтобы разработать ИУ с полосой пропускания до 1 МГц с хорошей линейностью. Так как современные ИУ с трансформаторной связью не позволяют обеспечить необходимую ПП, было предложено попробовать использовать ИУ с оптической связью. В ходе работы были собраны и испытаны различные макеты схем, и в результате был разработан и экспериментально проверен усилитель с ПП 0—1 МГц, обеспечивающий необходимую линейность передачи сигнала во всем диапазоне частот.

Литература

1. Юкио Сато Обработка сигналов. Первое знакомство. М.: Додэка XXI, 2002.

*И.В. Киселёв, А.Л. Политов, Н.С. Сергеев, студенты;
рук. С.Д. Федорович, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ВАКУУМНАЯ И ГАЗОВАЯ СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОГО СТЕНДА

На кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ» сооружается плазменная установка для исследования взаимодействия высокотемпературной плазмы с металлической поверхностью и плазменно-тепловых испытаний тугоплавких металлов, в том числе вольфрама, молибдена, стали и др. Цикл выполняемых работ направлен на создание технологии получения уникальной высокопористой структуры поверхности тугоплавких металлов с размером пор и нановолокон до 50 нанометров. Такие высокопористые материалы нового поколения востребованы для эксплуатации при экстремальных тепловых и плазменно-пучковых нагрузках, в том числе для термоядерных и атомных реакторов.

Основные параметры создаваемой установки представлены в работах [1,2]. Установка представляет собой линейную систему с мультикасповой схемой магнитного удержания плазмы. Магнитная система состоит из катушек с током, создающих продольное магнитное поле, и постоянных магнитов, обеспечивающих устойчивость линейного разряда. Продольное магнитное поле на оси – до 6 мТл. Диаметр вакуумной камеры – 180 мм, длина камеры – 600 мм, камера снабжена водным контуром охлаждения, что обеспечит стационарный режим разряда. Проектируемые параметры стационарного (длительностью до 60 мин и более) плазменного разряда: ток плазменного разряда – до 30А, плотность плазмы – до 10^{18} м^{-3} , электронная температура – до 4 эВ с фракцией горячих электронов – до 30 эВ, ионный поток из плазмы на металлический тестовый образец – до $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, рабочий газ – гелий, аргон, дейтерий.

Авторами получены расчетные данные по расходу плазмообразующего газа для поддержания плазменного разряда, спроектирована система вакуумирования разрядной камеры, разработана методика расчета необходимого расхода газа. Методом постоянного объема выполнена калибровка шкалы расхода газа для газовых натекателей. В настоящее время проводятся работы по выбору оптимальных режимов напуска газа в вакуумную камеру установки.

Работа поддержана грантом РФФ 16-19-10531.

Литература

1. **Будаев В.П.** // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып.4.
2. **Takamura S.** // Journal of Nuclear Materials. 2015. 463. P. 325—328.

Д.А. Кретов, студ.; рук. А.В. Елецкий, д.ф-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УСИЛЕНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

В настоящее время активно развивается новое научное направление, которое предусматривает собой создание, исследование свойств, а также возможное применение углеродных наноструктур. Среди таких структур особенно стоит выделить углеродные [1].

Углеродные нанотрубки представляют собой протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких нанометров и длиной до микрометров, которые состоят из одного или нескольких гексагональных графитовых слоев, свернутых в трубки. Углеродные нанотрубки обладают аномально высоким аспектным отношением (отношение длины к диаметру), что открывает возможность более существенного усиления сигнала комбинационного рассеяния.

Целью исследования явилось изучение свойств УНТ и механизма усиления комбинационного рассеяния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- вырастить массивы УНТ с различными характеристиками (степень упорядочения, ориентация, геометрия, число слоев);
- изучить и оптимизировать механизм усиления комбинационного рассеяния.

Выращивание углеродных нанотрубок производилось методом, основанном на проведении реакций термохимического разложения углеродосодержащих газообразных соединений на поверхности металлического катализатора. Этот подход называется методом химического осаждения в парах (Chemical Vapor Deposition CVD).

Исследование механизма усиления комбинационного рассеяния с помощью УНТ проводилось с помощью спектрометра комбинационного рассеяния света.

В результате исследований было выявлено, что углеродные нанотрубки усиливают сигнал комбинационного рассеяния в два раза.

Литература

1. **Елецкий А.В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. №. 4. С. 401—438.

*А.Ю. Маркелов, асп.; рук-ли В.М. Кулыгин, к.ф.-м.н., доц.
(НИУ «МЭИ»); В.Л. Ширяевский, к.ф.-м.н., гл. эксперт
(АО «ВНИИАЭС», Москва);
С.В. Анпилов, к.ф.-м.н., м.н.с. (МГУ, Москва)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОДОВОЙ ЧАСТИ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТРО

Проблема накопления твердых радиоактивных отходов (ТРО) становится все более актуальной в связи с выводом из эксплуатации сразу нескольких энергоблоков АЭС, который будет происходить в РФ в ближайшем будущем. Для решения данной проблемы в опытно-демонстрационном инженерном центре по выводу из эксплуатации (ОДИЦ) в г. Нововоронеж был создан опытно-промышленный комплекс плазменной переработки радиоактивных отходов (КПП РАО). В КПП РАО для сокращения конечного объема ТРО используется шахтная печь, в подовой части которой происходит плавление отходов плазмотронами. Данный доклад посвящен анализу результатов численного моделирования теплофизических процессов, происходящих в подовой части шахтной печи, и альтернативных вариантов нагрева плавителя.

Для анализа теплофизических процессов и вариантов нагрева плавителя при ограничении мощности плазмотрона была построена 3D теплофизическая модель шахтной печи КПП с теплоизоляцией. При моделировании сырье рассматривается как пористая среда. В поде введены 10 см слой жидкого расплава, «горка» пористых минералов под шахтой печи, в шахту также подается пористый материал, близкий по свойствам к минералам.

Модель в программе Star CCM+ позволяет рассчитать поля температур, скоростей газа, давления и прочие теплофизические параметры печи. В модели учитываются ввод тепла, потери тепла с уходящим газом, через стенки пода печи, на разогрев сырья, плавление, перегрев.

Теплофизические расчеты подовой части шахтной печи во всех случаях показывают значительную неоднородность температуры слоя жидкого расплава в поде (~500 °С). Проведено численное моделирование различных вариантов решения данной проблемы: замена плазмотрона воздушной и кислородной горелками, омический нагрев шлака. Наиболее эффективный дополнительный нагрев обеспечивается омическим нагревом жидкого шлака, так ввод 10 кВт увеличивает среднюю температуру жидкого шлака на 150 °С.

В дальнейшем применение теплофизической модели подовой части шахтной печи может быть востребовано при разработке новых КПП ТРО, т.к. это позволяет проводить расчеты с варьированием исходных данных и подбирать наиболее оптимальные варианты нагрева плавителя.

*И.А. Хазиев, асп.; рук-ли А.В. Дедов, д.т.н., проф.; С.Д. Федорович
к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ, ЭЛЕКТРОННЫМ И ИОННЫМ ПУЧКОМ

В результате обработки наноструктурированных поверхностей лазерным, электронным и ионным пучком на поверхности материала образуются нано- и микроструктуры, которые оказывают влияние на характеристики материала, в том числе на смачиваемость и параметры кипения. Краевой угол смачивания для каждого материала зависит от геометрических параметров неровностей, от их типа и плотности расположения на поверхности. Различные покрытия материала и изменение краевого угла смачивания, как правило, влекут за собой интенсификацию теплообмена при кипении [1].

Образующиеся при облучении микро- и нано структуры создают дополнительные центры парообразования. Увеличение смачиваемости приводит к смещению температуры Лейденфроста и соответственно кризиса кипения в область больших температур, позволяя использовать большие параметры рабочего тела и большие тепловые потоки в теплообменном оборудовании [2].

В ходе исследования были определены краевой угол смачивания и параметры шероховатости для образцов, полученных при облучении поверхности лазерным, электронным или ионным пучком на установках КСПУ-Т, «Кальмар» и др. Также некоторые образцы были покрыты наноглеродистой сажей.

Литература

1. **Гогонин И.И.** Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2.
2. **Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.** Тепломассообмен: учебное пособие для вузов. — 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2005.

Секция 40

ТЕПЛОФИЗИКА

Председатель секции — д.ф.-м.н., профессор

О.А. Синкевич

Секретарь секции — к.т.н., доцент В.В. Глазков

Koliada Alina, student;

*supervisor Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. J rg Schumacher
(TU Ilmanau, Germany)*

GALERKIN-MODEL FOR MIXED CONVECTION FLOW

A simple Galerkin model for a shear flow which was originally developed Moehlis et al. [1] has been extended to mixed convection. The original model describes sinusoidal shear flow, in which the fluid between two free-slip walls experiences a sinusoidal body force (1) in the downstream direction.

$$F_x(y) = \frac{\sqrt{2}\pi^2}{4\text{Re}} \sin\left(\frac{\pi y}{2}\right). \quad (1)$$

We take a coordinate system with x pointing downstream, y in the direction of the shear, and z in the spanwise direction. The model contains a total of nine modes, including modes describing the basic mean velocity profile and its modification, downstream vortices, streaks, and instabilities of streaks, with other modes being a consequence of the nonlinear interactions.

The extension to mixed convection requires a constant temperature at the bottom and top plates. Further we include the temperature equation and the Boussinesq term into the equations of motion.

A system of differential equations is obtained by Galerkin projection. We obtain two more amplitude equations for temperature modes. They are solved with MatLab numerically and it was obtained the amplitudes for a typical chaotic transient for the domain of size $L_x = 4\pi$ and $L_z = 2\pi$, and Reynolds number $\text{Re} = 400$. The initial configuration is perturbed by a finite amplitude and triggers the dynamical evolution. For the particular cases that have been studied, we detect transient turbulence for this extended Galerkin model.

Reference

1. Moehlis J., Faisst H. and Eckhardt B. // New Journal of Physics. 2004. Vol. 6. Article No 56.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД-ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В работе исследуется метод прямого численного моделирования (DNS) МГД-теплообмена при турбулентном течении жидкого металла (ЖМ) - ртути в круглой горизонтальной трубе в продольном магнитном поле.

Моделирование проводилось со следующими характерными числами подобия: число Прандтля $Pr = 2.72 \cdot 10^{-2}$, диапазон чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 - 16 \cdot 10^3$, чисел Гартмана $Ha = 0 - 600$ и чисел Грасгофа $Gr = 10^6 - 10^8$.

В ходе работы были рассмотрены гидродинамическая и тепловая тестовые задачи, задача МГД-теплообмена в продольном магнитном поле в круглой горизонтальной трубе с учетом влияния свободной конвекции. Одним из важнейших приложений, где применение ЖМ имеет хорошие перспективы – это строящийся в настоящее время термоядерный реактор с магнитным удержанием плазмы (типа «Токамак»), в городе Карадаш во Франции.

Расчет основной задачи по исследованию влияния продольного магнитного поля на течение ЖМ в целом показал достаточно корректное соответствие с опытами, проводимыми ранее на кафедре инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» [1], и с теоретическими данными.

Были получены новые оригинальные результаты, связанные с неполным подавлением турбулентности в потоке при больших числах Гартмана в рассматриваемой геометрии, проведен и представлен детальный анализ этих данных. Прежде всего интерес вызывают построенные осредненные профили скорости и температуры, интенсивности турбулентных пульсаций скорости, а также сечения трубы, в которых наблюдается несимметричное распределение температуры стенки [2].

Литература

1. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2001.
2. **Устинов А.В.** Экспериментальное исследование влияния продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на развитие теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе: Дисс. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2002.

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОТДАЧИ В ТВС РЕАКТОРОВ С ВОДОЙ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для создания перспективных ядерных энергетических установок с водой сверхкритического давления нужно разработать новый метод расчета теплообмена. Поэтому необходимо получить достаточно простое для применения в инженерной практике соотношение, которое предсказывало бы с приемлемой точностью коэффициент теплоотдачи к воде сверхкритических параметров, движущейся в каналах сложной конфигурации, не только в условиях нормального теплообмена, но также и в режимах улучшенной или ухудшенной теплоотдачи.

В ходе проведенного исследования массива экспериментальных данных было установлено, что в случае каналов небольшого гидравлического диаметра определяющим фактором должно быть термическое ускорение. Влияние этого фактора на теплоотдачу можно учесть с помощью двух комплексных критериев, составленных из безразмерных чисел Рейнольдса $Re = Gd_T/\mu$, термического ускорения $K_A = q\beta/(Gc_p)$ и относительной энтальпии $(h - h_m)/h_m$ в форме $K_m = Re_m/K_{Am}^{0,5}$ и $K_h = K_m (h - h_m)/h_m$, где индекс m означает, что параметры среды выбираются при псевдокритической температуре t_m .

Возможность существования различных режимов (нормальной, улучшенной, ухудшенной или смешанной теплоотдачи) зависит от значения критерия K_m и может быть охарактеризована общим уравнением:

$$Nu_{ж.н} = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{ж}} \right)^{0,25} \left(\frac{\overline{c_p}}{c_{p ж}} \right)^n Y, \quad (1)$$

где $Y = [(1 - \zeta)Y_{ул} + \zeta Y_{ух}]$, $Y_{ул} = 1 + 1,5 \exp(-30K_h^2 + 3K_h)$, $Y_{ух} = 1 - 0,15 \exp \times (-125K_h^2 - 25K_h)$, $\zeta = \exp(-0,5K_m^2)$.

Формула (1) подтверждена опытными данными для труб, кольцевых каналов и пучков стержней в широкой области изменения геометрических и режимных параметров ($d_T = 2,5 \div 32$ мм; $p = 22,5 \div 28$ МПа; $G = 200 \div 2000$ кг/(м²·с); $q = 200 \div 2500$ кВт/м²), при этом расхождение между результатами расчетов и экспериментов в основном не превышает $\pm 20-25$ % (для пучков стержней ± 15 %).

А.А. Борцова, студ.; рук. О.А. Синкевич, д.ф.-м.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

ТОРНАДО КАК ТЕПЛОВАЯ МАШИНА, РАБОТАЮЩАЯ ПО ЦИКЛУ КАРНО

С середины XIX века основные закономерности поведения торнадо пытаются объяснить на основе термогидродинамических механизмов [1], в частности, рассматривая торнадо как тепловую машину с воздухом в качестве рабочего тела. Считается, что в торнадо преобразование тепловой энергии в кинетическую происходит в цикле Карно.

Сделаем оценку максимальной кинетической энергии воздуха в торнадо, если преобразования энергии происходит в цикле Карно, когда теплота Q передается от нижних нагретых слоев с температурой T_1 , а сбрасывается к более холодным верхним с температурой T_2 . Максимальная работа A_q , в которую может перейти теплота Q , рассчитывается следующим образом $A_q = Q\eta_K = \Delta S (T_1 - T_2)$. Здесь $\eta_K = (1 - T_1/T_2)$ — КПД цикла Карно, $\Delta S = S_1 - S_2 > 0$.

Учитывая, что в изотермическом процессе ($T_1 = \text{const}$) подвод теплоты связан с изменением давления рабочего тела от p_1 до p_2 ($p_1 > p_2$), максимальную работу A_q можно представить в виде $A_q = G_q c_v \xi (T_1 - T_2)$, где G_q — расход теплоносителя в цикле Карно, $\xi = \ln(p_1/p_2)^{\gamma-1} > 0$.

Если считать, что вся работа A_q переходит в кинетическую энергию потока, движущегося с характерной скоростью V , то имеет место равенство $A_q = G_v V^2/2$, где G_v — расход потока, над которым совершается работа в цикле Карно. В общем случае $G_q \neq G_v$. В этом случае максимальная скорость потока воздуха в торнадо, работающем как тепловая машина по циклу Карно, оценивается формулой $V_{\max} = (2 (G_q/G_v) c_v \xi (T_1 - T_2))^{0,5}$ м/с. Для характерных значений $p_1 = 750$ мм Hг, $p_2 = 735$ мм Hг, $G_q/G_v = 1$, $(T_1 - T_2) = 30$ К получаем вполне согласующееся с экспериментом значение $V_{\max} = 29$ м/с.

Литература

1. **Наливкин Д.В.** Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969.

А.А. Виноградов, Г.Б. Шмельков, студенты; рук-ли А.А. Чиндяков, к.т.н., н.с.; Ю.Б. Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА ПСЕВДОКАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОСЪЕМКИ

Процесс конденсации бинарных паровых смесей неограниченно смешивающихся жидкостей может протекать при возникновении различных непленочных режимов течения конденсата, в том числе псевдокапельного режима. Это связано с проявлением эффекта Марангони за счет различия коэффициентов поверхностного натяжения компонентов смеси. В ряде исследований проводилась видеосъемка процесса псевдокапельной конденсации паровой смеси вода—этанол на пластинах и трубах с целью изучения механизма этого сложного явления. Однако все они были выполнены в условиях движения паровой смеси со сравнительно высокой скоростью (в [1] — до 15 м/с).

В данной работе при экспериментальном исследовании теплообмена в условиях псевдокапельной конденсации практически неподвижной паровой смеси вода—этанол на поверхности вертикальной трубы при различных концентрациях этанола в смеси (массовая доля в паре от 0,4 до 16 %) одновременно выполнялась скоростная видеосъемка процесса конденсации; некоторые ее результаты представлены в докладе.

При минимальных температурных напорах между паром и стенкой (ΔT) конденсат стекает в виде пленки. С ростом ΔT на поверхности пленки появляются отдельные мелкие, сравнительно медленно растущие, капли конденсата. При увеличении ΔT до значений, несколько превышающих разность температур конденсации и кипения смеси, происходит переход к псевдокапельному режиму конденсации, что сопровождается резким ростом коэффициента теплоотдачи. Дальнейший рост ΔT приводит к слиянию капель, скатывающихся с поверхности конденсации, в нерегулярные ручейки, которые в нижней части трубы объединяются в пленку с сильно возмущенной поверхностью; при этом коэффициент теплоотдачи заметно снижается. При максимальных ΔT (около 40 К), полученных в работе, по всей высоте трубы образуется сравнительно гладкая пленка конденсата, а значения коэффициента теплоотдачи приближаются к рассчитанным по теории Нуссельта для пленочной конденсации данной паровой смеси на вертикальной трубе.

Литература

1. **Effects** of vapor velocity and pressure on Marangoni condensation of steam-ethanol mixtures on a horizontal tube / H. Ali, H.S. Wang, A. Briggs, J.W. Rose // J. Heat Transfer. 2013. Vol. 135. Issue 3. 031502.

ПРЕДЕЛ УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ СЛОЖНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Зачастую оптическая регистрация является практически единственно возможным способом диагностики объекта. Примерами могут служить диагностика горячей плазмы (с температурой порядка 10^4 К), сонолюминесценция, астрономические наблюдения и пр. Во всех этих случаях зондовая диагностика либо невозможна в принципе, либо (во втором случае) ее техника нуждается в весьма серьезной теоретической и практической проработке.

Важнейшим параметром, определяющим качество оптической системы, является ее предельное угловое разрешение. Данный фактор является определяющим для астрономических наблюдений; для регистрации такого столь слабого свечения, как многопузырьковая сонолюминесценция, применяются специальные светочувствительные камеры (на основе которых, в частности, осуществляется и спектральная диагностика объекта), оптическое разрешение которых также принципиально важно для увязки наблюдаемого свечения и кавитационных пузырьков.

Как известно, предел разрешения оптической системы можно определить с помощью критерия Рэлея:

$$\theta_{\min} = 1,22 \lambda / D, \quad (1)$$

где θ_{\min} — предельное угловое разрешение; λ — длина волны; D — диаметр объектива. Данная формула получена в приближении малых углов для некогерентного излучения; в качестве физического критерия здесь выступает необходимое расстояние между центрами дифракционных картин (равное $0,61\lambda/\beta$, где β — угловой размер диафрагмы) от двух источников излучения. Несмотря на некоторую условность данного критерия, следует отметить, что он находит в оптике весьма широкое и успешное применение.

Однако критерий (1) получен для весьма простой оптической системы: для случая, когда дифракция в оптической системе имеет место только на границе объектива. Во многих ситуациях подобного представления достаточно, но далеко не во всех оптических системах имеется единственная граничная поверхность. Для некоторых оптических систем (например, различных систем Кассегрена) следует рассматривать более сложный ход световых лучей, что приводит к изменению вида критерия типа (1). В работе получена модификация критерия и определены ограничения на его применимость.

МЕХАНИЗМ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Популярным методом определения тепловых свойств веществ является метод лазерной вспышки, суть которого заключается в снятии термограммы с поверхности плоского образца, нагреваемого кратковременным лазерным импульсом на противоположной поверхности. С помощью известных теоретических зависимостей отсюда можно извлечь значение температуропроводности вещества.

Для пористых материалов, однако, ситуация несколько иная. На рис. 1 представлена микрофотография порошкообразного графита с указанием характерного размера зерен; а на рис. 2 — термограмма нагрева подобного вещества.

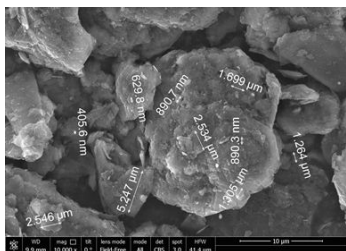


Рис. 1. Порошок графита

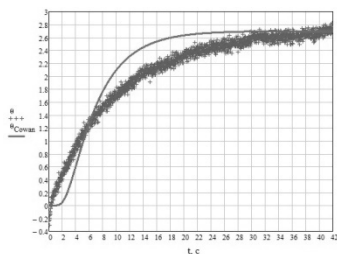


Рис. 2. Термограмма нагрева (точки) и теоретическая кривая модели Кована

Таким образом, экспериментальная кривая качественно отличается от теоретической зависимости, и, следовательно, обычное уравнение теплопроводности не может применяться к описанию подобных веществ. Подобное рассогласование теории и эксперимента отнюдь не ново и описано, например, в [1]. Однако обычно в качестве конкурирующей теоретической модели используется телеграфное уравнение, физическое обоснование применения которого, равно как и корректность получаемых с помощью него результатов, в данном случае сомнительна.

Литература

1. Roetzel W., Putra N., Das S.K. Experiment and analysis for non-Fourier conduction in materials with non-homogeneous inner structure// J.Thermal Sciences. 2003. Vol. 42. P. 541—552.

*В.Э. Зинуров, А.И. Файзуллина, М.Ю. Шалина, студенты;
рук-ли О.С. Дмитриева, к.т.н., с.н.с. (КГЭУ, г. Казань);
С.Ф. Лорай (МОРФ г. Казань)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ВВОДА ПРИСАДКИ В ВОЗДУХОВОД

В настоящее время на многих предприятиях в котельных в качестве топлива используется мазут, но в то же время это является источником загрязнения окружающей среды. Например, вследствие использования высокосернистого вязкого мазута происходит загрязнение атмосферного воздуха из-за большого выброса количеств токсичных оксидов серы и азота. Также в течение производственного процесса происходят химические реакции, в ходе которых образуется серная кислота, являющаяся причиной коррозионных повреждений поверхности воздуховода [1].

Одним из ключевых направлений повышения эффективности и уменьшения негативного влияния на окружающую среду при использовании жидкого топлива является добавление присадок. Использование присадки к мазуту в виде обезвоженного карбонатного шлама водоподготовки позволяет химически связывать серу, содержащуюся в топливе, в процессе его сгорания, тем самым уменьшая коррозию металла и выбросы оксидов серы в атмосферу [1]. Основная цель сводится к определению оптимальной фракции ввода присадки в воздуховод.

Целью данного исследования было определить, какие фракции частиц присадки из исследуемой области будут оставаться в воздуховоде, а какие будут уноситься воздухом по трубе. Для этого была построена модель воздуховода и задавались различные условия. Применительно к воздуховоду было задано давление на выходе из воздуховода 1 бар и на входе задавалась скорость 10—25 м/с. У частиц изменяли теплофизические параметры, а именно плотность и их диаметр. В результате были сделаны следующие выводы: диаметр частиц оказывает существенное влияние на область уноса. Оптимальным выбором будет диаметр частиц 100 мкм при плотности 2000 кг/м³; при скорости потока воздуха более 15 м/с и плотности, равной 2000 кг/м³, область уноса будет равной всей исследуемой области.

Полученные данные подтверждают необходимость дальнейших исследований по совершенствованию ввода присадки в воздуховод.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8 (договор № 14.Z56.16.5215-МК от 14 марта 2016 г.).

Литература

1. **Зверева Э.Р.** Ресурсо-, энергосберегающие технологии в мазутных хозяйствах тепловых электрических станций. Казань: КГЭУ, 2010.

*Н.О. Зубов, асп.; рук-ли О.Н. Кабаньков, к.т.н., доц.;
В.В. Ягов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ ПРИ НИЗКИХ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Течение двухфазных теплоносителей широко используются в технике. Подавляющее большинство подобных систем работает в области высоких давлений, однако для ряда технологий интерес представляют низкие давления в области атмосферного и ниже.

В настоящее время существующие расчетные методики, как правило, являются эмпирическими и ориентированы на высокие приведенные давления. При расчете ключевыми проблемами являются определение продольного градиента давления, истинного объемного паросодержания и определения границ смены режимов двухфазного потока.

Одним из направлений для создания надежной методики расчета является сопоставление имеющихся в литературе опытных данных и предлагаемых методик расчета градиента давления в двухфазном потоке.

Для проверки методики расчета падения давления в двухфазном потоке на первом этапе были использованы работы, содержащие опытные данные по градиенту давления в адиабатном двухфазном потоке, в которых в качестве рабочих жидкостей использовались вода и воздух. Для сопоставления были обработаны более 750 опытных точек разных авторов.

При расчете градиента давления в настоящей работе применялись модифицированная с учетом истинной плотности смеси гомогенная модель и модель кольцевого течения. Истинное объемное паросодержание, определенное с учетом фактора распределения и локального скольжения фаз, использовалось в качестве параметра, определяющего границу применимости моделей течения.

По результатам сопоставления можно сделать вывод о хорошем согласии результатов расчета с данными эксперимента. С учетом исключения режимов с малыми числами $Re < 1500$, отклонение расчетных точек не превышает 30 %, для отдельных режимов демонстрируется хорошее согласие на уровне 10 %. Обнаружено, что предлагаемые расчетные методики показывают хорошие результаты как для микроканалов, так и для каналов большого диаметра. Сопоставление результатов с расчетами авторов работ по известным эмпирическим методикам говорит о том, что предлагаемые расчетные методики настоящей работы не уступают распространенным на сегодняшний день эмпирическим методам расчета, не имеющим в своей основе теоретического обоснования.

Н.С. Иванов, студ.; рук-ли Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф.;
А.В. Лавриков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ Al_2O_3

Наночастицы сегодня находят все более широкое применение. Современной промышленности необходимы более простые и дешевые методы получения различных наноматериалов без потери их качества и технологичности. Ведь известно, что вещество в наноразмерном виде имеет другие свойства по отношению к обычной модификации. Исследование и создание методов получения наночастиц является одной из важных задач современной наноинженерии. Экспериментально доказано: нанесение наночастиц на поверхность микроканала позволяет повысить критическую тепловую нагрузку при кипении в 2—3 раза [1]. В общем же случае критическая тепловая нагрузка растет с уменьшением контактного угла θ .

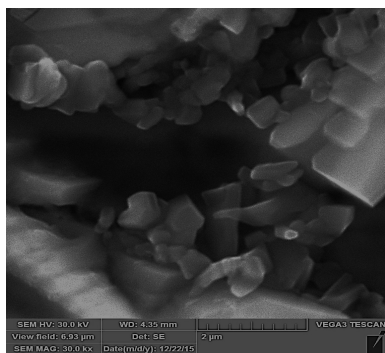


Рис 1. Нанесенный на поверхность раствор Al_2O_3

методов. Частицы Al_2O_3 в α -модификации имеют размер от 70 до 90 нм. Исследуются способы получения оксида алюминия золь-гель методом, разложением, химическим осаждением под действием микроволнового излучения. Полученные образцы исследованы с помощью РЭМ-микроскопии (рис. 1), проведен анализ результатов синтеза.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-00775.

Литература

1. **Исследование** краевых углов и кризиса кипения на поверхности с искусственным нанорельефом / Ю.А. Кузма-Кичта, В.М. Жуков, А.В. Лавриков и др. // Тепловые процессы в технике. 2013. № 5. С. 21—26.

П.К. Канин, М.А. Денисов, студенты; рук. В.В. Ягов, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ТЕПЛОБМЕНЕ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Пленочное кипение недогретой до температуры насыщения жидкости – явление, актуальное для процессов закалки и систем аварийного охлаждения активной зоны АЭС. По результатам многих исследований обнаружен рост КТО с увеличением степени недогрева. Кроме того, при кипении воды, недогретой более чем на 20 К, наблюдается нарушение устойчивости паровой пленки и огромный скачок КТО. Плотности теплового потока для такого режима могут превышать 5 МВт/м^2 , что совершенно не характерно для устойчивого пленочного кипения. Впервые этот интенсивный режим упоминается в работе [1]. Обнаруженный режим назван авторами «микропузырьковым» кипением (microbubble boiling). При температурах охлаждаемого медного шара 400—500 °С и недогревах воды более 22 К ими получены КТО, на 1—2 порядка превосходящие значения, характерные для насыщенной жидкости.

Чтобы выявить механизмы интенсивного теплообмена при пленочном кипении, на кафедре ИТФ МЭИ были реализованы эксперименты по охлаждению высокотемпературных шаров из разных материалов (никель, нержавеющей сталь, медь) в неводных жидкостях (перфторгексан, изопропиловый и этиловый спирты). Но даже при достижении огромных недогревов (до 170 К), при варьировании давлений от 0,1 до 1 МПа, режим «микропузырькового» кипения не обнаружен. Тем не менее, полученный массив опытных данных представляет самостоятельный научный интерес. Была скорректирована приближенная полуэмпирическая модель, предложенная в 2009 году В.В. Яговым и М.А. Лексиним. Модель основана на предположении о ламинарном течении пара в пленке, что оправдано для больших недогревов жидкостей. Для турбулентного течения пара в пленке, что характерно для экспериментов на слабо недогретой (менее 20 К) воде, предложено соотношение, основанное на формуле Д.А. Лабунцова для пленочного кипения насыщенной жидкости. Обе формулы описывают большой массив данных с погрешностью $\pm 30 \%$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-0091).

Литература

1. Aziz S., Hewitt G.F., Kenning D.B.R. Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres // Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco. 1986. Vol. 5. P. 2149—2154.

Ю.А. Левашов, студ.; рук-ли Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф.;
А.В. Лавриков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРА С ПОКРЫТИЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ В ЗОНЕ ИСПАРЕНИЯ

Для круглогодичного поддержания в мерзлом состоянии грунтов в основаниях любых инженерных сооружений в районах вечной мерзлоты используются термостабилизаторы.

С целью улучшения работы термостабилизаторов необходимо повысить интенсивность теплообмена в зонах конденсации и испарения.

В настоящей работе для интенсификации теплообмена в испарителе термостабилизатора используется покрытие из наночастиц SiO₂ размером 100 нм [1]. Мы предполагаем, что в случае термостабилизатора с покрытием из наночастиц в испарителе произойдет перемещение уровня жидкости, как показано на рис.1, и повысится отводимый тепловой поток.

Термическое сопротивление термостабилизатора определяется как

$$R = \Delta T / q, \quad (1)$$

где ΔT — разность температур между испарителем и конденсатором; q — тепловая нагрузка термостабилизатора.

Разность температур между испарителем и конденсатором определяется с помощью дифференциальной термопары или тепловизора. Тепловая нагрузка находится с помощью датчиков теплового потока. Для измерения хладопроизводительности используется тепловизор. В настоящее время в качестве рабочей жидкости в модели термостабилизатора используется хладон 22. В дальнейшем предполагается перейти к хладону 134а.

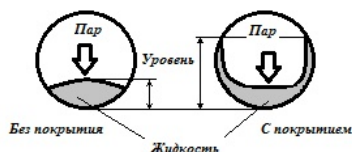


Рис. 1. Уровень жидкости в трубе с покрытием из наночастиц и без покрытия [1]

с помощью дифференциальной термопары или тепловизора. Тепловая нагрузка находится с помощью датчиков теплового потока. Для измерения хладопроизводительности используется тепловизор. В настоящее время в качестве рабочей жидкости в модели термостабилизатора используется хладон 22. В дальнейшем предполагается перейти к хладону 134а.

Литература

1. 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. № 9. С. 395—401.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ МАЛОЙ АКТИВНОСТИ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Радиометрические (радиоизотопные) методы давно известны и широко используются в самых различных научных исследованиях и инженерных измерениях. Радиометрические методы могут быть использованы для измерения объемного содержания паровой фазы внутри жидкости, определения состава смеси, скорости звука и пр. Основой перечисленных методов является определение плотности вещества с помощью его гамма-облучения при использовании соотношения

$$\rho = \frac{1}{x\mu_m} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (1)$$

Здесь толщина материала x и скорости счета на пустой и полной ячейках N_0 и N (соответственно) определяются в эксперименте, а массовый коэффициент ослабления находится из справочных данных (например, из базы данных NIST).

Однако традиционные, хорошо апробированные методы имеют известные недостатки: во-первых, формула (1) пригодна только для коллимированного пучка гамма-излучения, что влечет за собой требование высокой активности источников (порядка мКи и более), во-вторых, использование источников излучения с энергией гамма-квантов порядка 1 МэВ затрудняет определение состава смеси и реализует указанный метод со значительной погрешностью, так как для таких энергий массовые коэффициенты ослабления различных атомов довольно близки друг другу.

В данной работе для преодоления всех перечисленных трудностей используются гамма-спектрометрические методы.

Так, определение плотности вещества становится возможным при использовании широкого пучка гамма-излучения от источника ^{137}Cs активностью всего лишь ~ 20000 Бк; это решает множество проблем, в том числе связанных с вопросами радиационной безопасности во время проведения экспериментов. При облучении исследуемого вещества пучком тормозного излучения от β -активного источника становится возможным проведение измерений на энергиях квантов $\sim 0,1$ МэВ, что гораздо более удобно для диагностики состава смесей: при подобных энергиях массовые коэффициенты ослабления веществ различаются уже заметнее, что приводит к уменьшению фактической погрешности метода.

ПЕРЕКАЧКА ГАЗА НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ — НЕОБХОДИМА СМЕНА ПАРАДИГМЫ

Одним из актуальных направлений работы по использованию низкопотенциального тепла является создание энергетических установок, работающих по органическому циклу Ренкина.

На магистральных газопроводах установлены сотни газотурбинных компрессорных станций со сбросом горячих газов в атмосферу. Целесообразно утилизировать тепло уходящих газов, применяя установки, работающие по ОЦР. В настоящее время в России отмечается тенденция по снижению уровня добычи природного газа, поэтому компрессорные станции вскоре перестанут работать на полную мощность. В работе предложена концепция газоперекачивающей электростанции (ГПЭ), состоящей из газотурбинной электростанции с дополнительным рабочим ОЦР циклом. Энергогенерирующее оборудование запитывает газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с электроприводом. Избыточную же электроэнергию ГПЭ выдает в сеть. Показано, что стоимость ГПЭ не выше стоимости аналогичного набора ГПА с ГТУ приводом. Замена на ГПЭ позволит поднять КПД ГПА минимум на 15 %, увеличив коэффициент использования оборудования и сократив срок его окупаемости. Даже при

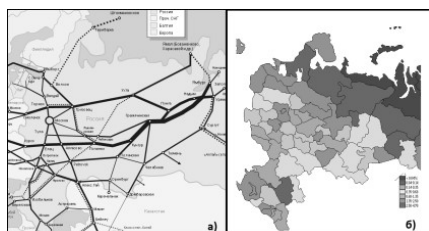


Рис. 1. Единая система газоснабжения России (а) и плотность населения (б)

остановке перекачки газа по трубопроводу ГПЭ будут продолжать работу в режиме выработки электроэнергии для внешних потребителей — значительная часть трубопроводной системы РФ находится в зоне с достаточно высокой плотностью населения (рис. 1).

В связи с напряженной политической ситуацией развитие системы газопроводов между Россией и другими странами фактически приостановлено. В работе предлагается вместо веток перекачки газа по морскому дну строить на берегу заводы по ожижению природного газа. Показано, что затраты на ожижение будут меньше, чем энергозатраты ГПС, устанавливаемых на берегу при прокачке газа по трубопроводам. Заводы по ожижению газа сбрасывают в атмосферу огромное количество горячих газов, которые также можно использовать в ОРЦ установке, снизив тем самым энергозатраты на ожижение.

С.Е. Маркина, М. А. Кондратьев, студенты; рук-ли
В.В. Глазков, к.т.н., доц.; Д.А. Бирюков, к.т.н., н.с. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ И МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ТЕПЛЕ

На кафедре ИТФ МЭИ совместно со Сколковским институтом науки и технологий («Сколтех»), ведутся работы по созданию компактной малогабаритной демонстрационной энергетической установки малой мощности (0,2—2 кВт), реализующей органический цикл Ренкина (ОЦР). Модификация установки, предназначенная для совместной работы с ДВС, будет использоваться для своей работы тепло выхлопных газов с КПД около 14 %. Модификация установки для геотермальной и гелиоэнергетики будет использовать низкопотенциальное тепло из водяного теплового аккумулятора с КПД около 11 %. Конструкция установки базируется на стандартных технологических решениях и блоках, используемых в коммерческих холодильных установках и установках кондиционирования воздуха. Полученные результаты могут найти весьма широкое применение в промышленности, где неиспользуемые ресурсы низкопотенциального тепла чрезвычайно велики (в сельском хозяйстве, автомобильной индустрии и т.д.).

В настоящее время уже собрана установка, предназначенная для совместной работы с ДВС (рис. 1), где в качестве замены выхлопных газов используется воздух, нагретый в промышленной тепловой пушке. Установка находится в процессе отладки. Проводятся первые эксперименты, анализ и обработка получаемых данных.

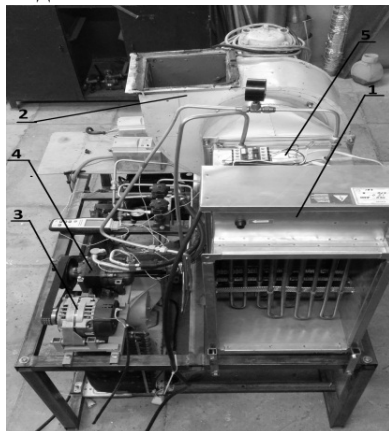


Рис. 1. ОЦР-установка, вид спереди: 1 — нагреватель; 2 — улитка с радиальным вентилятором; 3 — электродгенератор; 4 — экспандер; 5 — испаритель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБЕ ПО КОНВЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ

Колебания, возникающие в камере сгорания, могут существенно нарушить процесс горения. Целью работы является определение границ устойчивости термических колебаний в цилиндрической трубе, моделируемых по конвективной модели. Представим подвод теплоты в прямоугольной форме $\bar{Q}(x) = Q_0 [H(x - \lambda_1) - H(x - \lambda_2)]$.

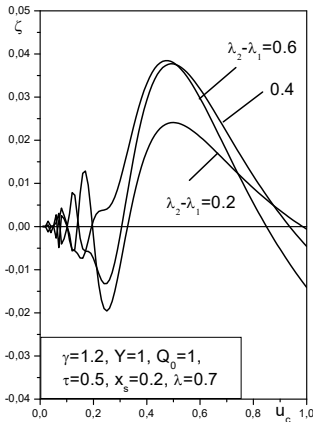


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от скорости u_c

С увеличением $\lambda_2 - \lambda_1 = 0,1$ положительные значения ζ находятся в интервале $0,64 < x < 0,94$. Для $\lambda_2 - \lambda_1 = 0,2$ интервал устойчивых решений имеет границы $0,65 < x < 0,89$. Минимальный интервал устойчивых решений наблюдается для $\lambda_2 - \lambda_1 = 0,4$. При $\lambda_2 - \lambda_1 > 0,4$ решения неустойчивы [1]. Таким образом, при увеличении площади между ломаной и осью Ox увеличивается граница устойчивости колебаний газа, т.е. положение теплоподвода смещается влево.

Литература

1. Hyun – Gull Yoon, John Peddieson Jr., Kenneth R. Purdy. Mathematical modeling of a generalized Rijke tube // International Journal of Engineering Science. 1998. 36. P. 1235—1264.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ СВЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ МНОГОПУЗЫРЬКОВОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Известны две конкурирующие теории возникновения сонолюминесценции (свечения жидкостей при мощном ультразвуковом воздействии): тепловая и электрическая. Тепловая теория подразумевает достижение в схлопывающемся пузырьке весьма высоких температур, достаточных для возникновения теплового излучения; один из вариантов этой гипотезы – теория горячего пятна – предполагает наличие высоких температур в жидкости вокруг пузырька. В электрических теориях считается, что причина свечения – газовые разряды внутри пузырьков. Таким образом, в обеих теориях предположительная причина свечения — пузырьки в жидкости. Для области жидкости, прилегающей непосредственно к ультразвуковому волноводу, заключение о решающей роли газовой фазы в возникновении свечения представляется безусловно верным (заметим, что впервые оно было высказано еще Я.И. Френкелем в 40-х годах XX века [1]). И несмотря на тот факт, что и для внутреннего объема жидкости электрическая гипотеза кажется предпочтительной, все же отдельные факты, наблюдаемые в экспериментах по многопузырьковой сонолюминесценции, побуждают рассмотреть более экзотические теории возбуждения свечения при воздействии ультразвука на жидкость.

Во многих экспериментах наблюдается следующая картина: вначале свечение существует только на ультразвуковом волноводе, и лишь через некоторое время — порядка секунд — светиться начинает и основной объем жидкости, причем интенсивность свечения примерно одинакова по высоте сосуда. Если допустить, что свечение вызывается заряженными частицами, эмитируемыми областью возле волновода (за счет газовых разрядов), то не вполне ясна как задержка возникновения свечения в глубине жидкости, так и однородность области данного свечения. Интересным механизмом возбуждения свечения, достойным, по крайней мере, обсуждения, является механизм перестройки молекулярной структуры жидкости под воздействием ультразвука. В случае возникновения в подобных условиях в жидкости ближнего порядка, сонолюминесценцию можно попытаться объяснить высвечиванием спонтанно возникающих в жидкости люминесцентных центров по аналогии с неорганическими сцинтилляторами. В этом случае источником свечения при многопузырьковой сонолюминесценции будет являться газовая фаза в области рядом с ультразвуковым волноводом и жидкая – в остальном объеме.

Литература

1. **Френкель Я.И.** Кинетическая теория жидкостей. М.–Л.: Изд-во АН СССР. 1945.

Д.А. Мусальников, студ.; рук. Д.А. Бирюков, к.т.н., н.с. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СФОРМИРОВАННОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

Возникновение эмиссии света при гидродинамических эффектах впервые было открыто в 1947 году В.А. Константиновым [1]. В 1990 году М.А. Маргулис провел подробное исследование данного явления и ввел термин гидролюминесценции (ГЛ) [2]. Возникновение ГЛ обусловлено кавитационными явлениями в объеме движущейся струи жидкости через узкие диэлектрические каналы. Возникающее свечение сопровождается, по некоторым данным [3], гамма-излучением с мощностью экспозиционной дозы 0,85 мкР/с при энергии излучения ~0,3 МэВ. Исследование данного эффекта необходимо для понимания физической природы ГЛ, так как наличие гамма-излучения могло бы свидетельствовать о протекании ядерных реакций синтеза с участием легких ядер, что само по себе перевело бы данное явление в область уникальных. Основной теорией, объясняющей ГЛ, является образование электрических разрядов, вызванных трибоэлектрическими эффектами, и наибольшее, что можно ожидать в интенсивных электрических разрядах — при условии истинности «электрических» гипотез — мягкое рентгеновское излучение. На кафедре ИТФ МЭИ совместно с лабораторией 2.1.2.1 ОИВТ РАН проводятся систематические исследования ГЛ. Для этого создается универсальный экспериментальный комплекс АГЛ (акустической и гидравлической люминесценции), включающий в себя экспериментальную установку генерации ГЛ, позволяющую проводить исследование данного явления в диапазонах давления до 160 атм на различных жидкостях (дистиллированная вода, масло И-20, И-40, глицерин 99 %). В ходе выполнения работ в качестве рабочей жидкости использовалось масло И-40А. ГЛ исследовалась в диапазоне давлений 20—80 атм. Измерения проводились с помощью гамма-спектрометров МКСП-01 и МКС-15ЭЦ. Никакого достоверного превышения интенсивности гамма-излучения при гидродинамической люминесценции над фоновыми значениями в диапазоне энергий от 60 кэВ до 3 МэВ не обнаружено.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, научный проект №16-38-60141.

Литература

1. **Константинов В.А.** // ДАН СССР. 1947. Т. 56.
2. **Маргулис М.А.** Сонолюминесценция, возникающая при гидродинамической кавитации. I. Основные характеристики процесса // ЖФХ. 1990. Т. 64. № 12.
3. **Колдамасов А.И.** Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 2.

*А.Р. Надырова, докторант; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

Поверхности нагрева – это поверхности стенок, отделяющих дымовые газы от нагреваемых сред, через которые происходит передача тепла. Этим поверхностям отводится главная роль, так как экономичность и эффективность работы котельного агрегата в первую очередь зависит от их состояния и исправности. В последние годы все большее распространение получает моделирование процессов, протекающих на поверхностях теплообмена, для их совершенствования и развития [1, 2].

Исследования проводились на котле КВ-Т-116,3-150, работающем на каменном угле марки Д разреза Каражыра ВКО с рабочей влажностью 14 %, рабочей зольностью 21,44 % и низшей теплотой сгорания 18855 кДж/кг. Коэффициент избытка воздуха изменялся в зависимости от теплопроизводительности котла на основании режимной карты.

Для выявления степени нагрева теплообменных поверхностей топки при соответствующих условиях эксплуатации было проведено тепловизионное обследование при помощи тепловизора ИРТИС – 2000. В результате была сформирована картина распределения температур и тепловых потоков на обследуемых поверхностях.

По полученным значениям температур были построены изотермические поверхности для фронтальной, правой, тыльной и левой стенок топки котла при различных теплопроизводительностях и установлена зависимость потерь тепла от условий эксплуатации.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании, реконструкции и модернизации теплоэнергетического оборудования.

Литература

1. **Бойко Е.А.** Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие. Красноярск: КГТУ, 2005. 292 с.
2. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Численное моделирование топочного процесса низкокислородного вихревого котла // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 7. С. 59–66.

С.К. Подгорный, студ.; рук. В.С. Кузеванов, д.т.н., проф.
(филиал МЭИ в г. Волжском)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ТИПА МГР

Ядерный реактор типа МГР (модульный гелиевый реактор) является перспективным графито-газовым, охлаждаемым гелием (He). Топливо — ^{235}U с 14 % обогащением. Тепловыделяющие сборки в данном типе ядерного реактора выполнены призматическими. Активная зона выполнена из тепловыделяющихборок и отражателей, расположенных как изнутри, так и снаружи активной зоны. Материал тепловыделяющихборок — графит. Для охлаждения тепловыделяющихборок в них предусмотрены каналы круглого сечения.

Из теории теплообмена известно, что коэффициенты теплоотдачи для газов имеют довольно низкое значение. Таким образом, для съема тепла с тепловыделяющей сборки необходимо обеспечивать довольно высокие значения коэффициента теплоотдачи в охлаждающем канале. Для этого требуется поддерживать высокую скорость He в канале, которую обеспечивает реакторная газодувка. Наличие газодувки значительно увеличивает затраты на собственные нужды. Путем интенсификации теплообмена в охлаждающих каналах тепловыделяющихборок возможно снизить энергетические затраты на работу газодувки за счет уменьшения средней скорости движения He в реакторе. Понижение скорости движения He дополнительно снизит нагрузку на основные элементы реактора. Например, на корпус, который является самой важной частью реактора [1].

Интенсификации теплообмена в каналах круглого сечения можно добиться изменением конфигурации поперечного сечения канала, либо установкой на входе завихрителей или навивкой на внутреннюю поверхность канала.

Технологические мероприятия по интенсификации теплообмена в охлаждающих каналах тепловыделяющихборок позволят снизить затраты энергоблока на собственные нужды и повысить надежность ядерного реактора за счет снижения скорости движения He.

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1996. 304 с.

*К.И. Русакова, П.В. Медведева, студенты;
рук. О.С. Попкова, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ОДНОРОДНОЙ СМЕСИ

Изучению скорости распространения пламени в турбулентном потоке с помощью экспериментальных методов уделено внимание в значительном количестве работ. Из-за различной методики проведения эксперимента полученные результаты иногда противоречат друг другу. Целью работы является нахождение способа определения скорости распространения пламени в турбулентном потоке однородной смеси.

Основным принципом для определения скорости распространения пламени в турбулентном потоке является принцип Михельсона. По этому принципу скорость U_T зависит от объемного расхода горючей смеси V и осредненной сглаженной поверхности пламени $S_{пл}$ [1], которые определяются экспериментально:

$$U_T = V/S_{пл} . \quad (1)$$

Найденная таким образом скорость распространения пламени является средней для всего факела. Для нахождения местной величины U_T , для расчета по этой формуле следует брать объемный расход и площадь поверхности соответствующего участка пламени.

Тогда для малого участка поверхности пламени можно записать

$$U_T = \Delta V/\Delta F , \quad \Delta V = \Delta S w_a . \quad (2)$$

Отсюда

$$U_T = \Delta S w_a / \Delta F . \quad (3)$$

В пределе при устремлении размеров рассматриваемого участка к нулю получаем

$$U_T = w_a \sin \alpha , \quad (4)$$

где w_a — местная скорость потока; α — угол между направлением скорости потока и поверхностью пламени в рассматриваемом участке.

Таким образом, формула для расчета скорости в рассматриваемой точке U_T совпадает с формулой для расчета локальной величины скорости распространения пламени по принципу Михельсона.

Литература

1. **Ильяшенко С.М., Талантов А.В.** Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТРУИ, ВТЕКАЮЩЕЙ В ПОЛУЗАМКНУТЫЙ ОБЪЕМ

В газовой динамике распространение осесимметричной струи во встречном потоке в цилиндрических камерах — часто встречающееся явление. При некоторых условиях взаимодействие осесимметричной струи во встречном потоке приобретает неустойчивый характер. Без расчета струи определение границ устойчивости не представляется возможным. Целью работы является определение «дальнобойности» струи. Рассмотрим встречный поток, который, обтекая зону разворота струи, ускоряется до скорости u^* . Измерения скорости u^* и давления p^* показали, что в пределах начальной зоны эти параметры изменяются незначительно и их можно считать постоянными.

Уравнения сохранения расхода и количества движения можно преобразовать к следующему виду [1]:

$$\bar{r}_{03} = -0,333 + \sqrt{-0,222 + \left(2z^2 + \bar{R}_0^2 (\bar{u}_*^2 - 1)\right) / \bar{u}_*^2}, \quad (1)$$

$$\bar{u}_* = -3 \left(z + \bar{R}_0^2 \right) / \left(3\bar{R}_0^2 - (\bar{r}_3^2 + \bar{r}_3 + 1) \right), \quad (2)$$

где $z = u_0 / u_\infty$, а $\bar{R}_0 = R_0 / r_0$.

Далее, решая совместно (1) и (2) для контура, ограниченного сечением, проходящим через основной участок, можно определить

$$\bar{r}_2 = \sqrt{\varphi(z) / \psi(\bar{u}_m)}, \quad \bar{r}_3 = (\bar{u}_m + 1) \bar{r}_2, \quad (3)$$

а также длины начального и основного участка:

$$\bar{x}_H = \sqrt{\varphi(z) / \psi(z)} / 0,27, \quad \bar{x}_\Pi - \bar{x}_H = \left[\sqrt{\varphi(z) / \psi(1)} - \sqrt{\varphi(z) / \psi(z)} \right] / 0,22, \quad (4)$$

где $\varphi(z) = 6z^2 + 9z + 2 + \sqrt{6z(z+1) + 1}$, $\psi(z) = z^2 + 4z + 3$.

Профили скоростей в основной зоне сильно деформируются. Поэтому точно рассчитать течение в этой зоне не представляется возможным:

$$\bar{x}_k - \bar{x}_\Pi = 1,56 \sqrt{\varphi(z) / \psi(1)}. \quad (5)$$

Тогда «дальнобойность» струи рассчитывается по формуле

$$\bar{l} = k(z) \bar{x}_H + (\bar{x}_\Pi - \bar{x}_H) + (\bar{x}_K - \bar{x}_\Pi). \quad (6)$$

На практике «безграничный» встречный поток создается струей достаточно большого диаметра D_0 , причем $D_0 \geq 2r_{03}$. Тогда по результатам расчетов $D_0 / l \geq 1$. Формула (6) позволяет рассчитать «дальнобойность» струи, необходимую для дальнейших расчетов.

Литература

1. **Абрамович Г.Н.** Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.

КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОГО ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА СРЕДЫ В МОДЕЛИ ПОРИСТОГО ТЕЛА

Для замыкания уравнений движения и теплопереноса, так называемых уравнений модели пористого тела, была разработана методика осреднения $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Центральным параметром полученной интегральной модели турбулентности является коэффициент ${}^{\text{яч}}\nu_t$, имеющий смысл эффективного коэффициента турбулентного переноса. Значимость этого коэффициента заключается в том, что по его величине можно определить компоненты тензоров переноса тепла и импульса. Соответственно отпадает необходимость использовать большое число различных замыкающих констант, определение которых возможно только путем проведения весьма сложных экспериментов.

Тем не менее, развитие методик расчета на основе модели пористого тела сдерживается отсутствием экспериментальных данных по гидродинамике течения в ориентированных пучках стержней. В частности, актуальным остается исследование опорных деформационных течений.

Практически отсутствует информация об опорном коэффициенте эффективной вязкости $\mu_{\perp\uparrow}$ для течения, в котором реализуется перенос импульса вдоль стержней при их поперечном обтекании, и об опорном коэффициенте эффективной вязкости $\mu_{\perp\perp}$ для течения, в котором реализуется перенос импульса поперек стержней при их поперечном обтекании. Эти коэффициенты необходимы для определения коэффициента эффективного переноса импульса среды при произвольном направлении обтекания потока пучка стержней.

Также эти опорные коэффициенты связаны с эффективным коэффициентом турбулентного переноса соотношениями:

$$\mu_{\perp\uparrow} = {}^{\text{яч}}\nu_t \varphi \rho, \quad (1)$$

$$\mu_{\perp\perp} = {}^{\text{яч}}\nu_t (\varphi - \varphi_1) \rho, \quad (2)$$

где φ – пористость среды; φ_1 – пористость среды при плотной упаковке стержней, ρ – плотность жидкости.

Предложено два подхода к постановке эксперимента, целью которого является определение коэффициента эффективного переноса импульса среды в приближении модели пористого тела.

М.В. Свешников, асп.; рук-ли О.А. Синкевич, д.ф.-м.н, проф.;
В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ БОЛЬШИХ ЧИСЕЛ РЕЛЕЯ

Свободная конвекция – широко распространенное явление, которое, несмотря на многочисленные исследования и ряд важных результатов, до сих пор содержит ряд нерешенных проблем. Одной из них является моделирование свободной конвекции в различных геофизических процессах и в ряде технических устройств при больших геометрических масштабах. Целью настоящей работы является моделирование конвекции воздуха и элегаза SF₆ в рамках одномерной нестационарной модели конвекции, сформулированной в [1]. В рамках модели в замкнутом тороидальном контуре постоянного сечения (термосифоне) численно решаются нестационарное одномерное уравнение Навье—Стокса в поле силы тяжести в гидравлическом приближении, уравнение энергии, уравнение неразрывности и уравнение состояния идеального газа. Большой диаметр контура определялся вертикальным размером рассматриваемой задачи. Диаметр малого сечения контура определялся из решения задачи о глубине проникновения в жидкость тепловой волны при ее нагреве (охлаждении) в процессе ее периодического движения в конвективном вихре. Рассматривались случаи ламинарного и конвективного характера движения жидкости.

Для свободной конвекции в цилиндрической полости, а также в горизонтальном и вертикальном плоском слое для воздуха и элегаза SF₆ была получена зависимость числа Нусельта Nu (эффективной теплопроводности) от числа Релея Ra. Результаты демонстрируют неплохое совпадение с имеющимися экспериментальными данными [2] по конвекции в полости при больших числах Ra (10^9 — 10^{15}) и систематическое (на постоянный множитель, равный 3) завышение результатов для конвекции в плоском слое. Полученные результаты позволяют сформулировать гипотезу о специфике перехода из ламинарного движения в турбулентное в больших конвективных вихрях и предположить, что в ряде экспериментов, приведенных в [2], движение жидкости в вихрях было ламинарным.

Литература

1. Глазков В.В. Плетнёва Е.О., Синкевич О.А. Одномерное моделирование свободной конвекции в плоской щели. // Вестник МЭИ. 2012. № 4. С. 10—15.
2. Funfschilling D., Bodenschatz E., Ahlers G. Search for the «ultimate state» in turbulent Rayleigh-Benard convection // Phys. Rev. Lett. 2009.103. 014503.

У.А. Соколова, А.Р. Агишев, А.Н. Сунейкин, студенты;
рук. С.И. Харчук, к.ф.-м.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРАХ ЩЕЛЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Эффективность и надежность гидравлических машин (гидроцилиндров, гидроусилителей рулей, насосов, компрессоров и т. п.) во многом зависит от характеристик уплотнений.

В работе исследовались течения несжимаемой жидкости в щелевых зазорах, в кольцевой концентрической щели и кольцевой щели с эксцентриситетом.

С этой целью проведено численное моделирование ламинарного течения жидкости в щелевых зазорах в лицензионном гидродинамическом пакете FlowVision 3.09.04

Проведены сравнения с данными физических экспериментов [1]. Для обработки результатов использовали известную формулу Дарси, записанную в виде

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{Dr} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где Δp — перепад давления на щели; λ — коэффициент гидродинамического сопротивления; l — длина щели в направлении утечки; ρ — плотность жидкости; v — средняя скорость потока в щели.

Получено хорошее соответствие расчетных значений коэффициента гидродинамического сопротивления с данными эксперимента.

Литература

1. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. М.: Машиностроение, 1982. С. 12—16.

*А.Б. Тоимбаев, докторант; рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОМ НАСОСЕ

Применение тепловых насосов в альтернативной энергетике является принципиально новым решением проблемы теплоснабжения и позволяет в зависимости от сезона и условий работы достигать максимальной эффективности [1].

Экономическая эффективность применения теплонасосных систем теплоснабжения определяется выбором источника теплоты, режимными и технологическими характеристиками системы [2].

Моделирование позволяет изучать, прогнозировать и оптимизировать экономическую эффективность, понимать суть происходящих процессов при работе теплового насоса. Модели учитывают параметры и особенности физических процессов, протекающих в теплонаносной установке.

Автором получена действительная картина протекания теплообменных процессов в тепловом насосе при режимах работы, отличных от номинальных.

Разработан экспериментальный стенд для исследования работы теплового насоса, и на основе полученных параметров смоделированы теплообменные процессы в программе ANSYSFluent.

В результате работы были смоделированы особенности протекания теплообмена в элементах теплового насоса в зависимости от начальных параметров и факторов работы установки.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и оптимизации условий работы теплонасосных установок.

Литература

1. **Тоимбаев А.Б., Ермоленко М.В., Степанова О.А.** Эффективность работы теплового насоса при различных режимах // Молодой ученый. 2014. № 6.
2. **Гришков А.А.** Совершенствование режимных и технологических характеристик систем теплоснабжения малоэтажных жилых зданий при использовании источников низкопотенциальной теплоты: Автореферат дисс....канд. техн. наук.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОЛОСТИ

Перспективным направлением современной энергетики является международный экспериментальный термоядерный реактор (ИТЭР). В Российской Федерации предложена концепция термоядерного источника нейтронов (ТИН). При этом в качестве теплоносителя в ряде проектов рассматриваются расплавленные соли, которые на данный момент малоизучены. Важным является возможность использования воды в роли модельной жидкости при исследовании гидродинамики и теплообмена расплавов солей при течении в каналах blankets реактора.

В данной работе численно исследуется гидродинамика и теплообмен при свободной конвекции жидкости с числом Прандтля $Pr = 4$ в параллелепипеде, две противоположные вертикальные стенки которого равномерно обогреваются, а остальные стенки являются адиабатическими. Задача решалась методом прямого численного моделирования (DNS) [1], который позволяет исследовать турбулентные течения, не используя при этом какие-либо модели турбулентности, что является существенным преимуществом. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена проводилось с использованием приближения Буссинеска в диапазоне чисел Рэлея, характерных для ламинарной ($Ra = 10^4 - 10^6$) и турбулентной ($Ra = 10^9 - 10^{11}$) конвекции.

Были получены мгновенные поля температуры, векторные поля скорости в различные моменты времени в процессе эволюции; распределения температуры, компонент скорости, кинетической энергии турбулентности в срединном поперечном сечении полости; распределения локальных чисел Нуссельта по длине обогреваемой стенки, а также значения средних по высоте обогреваемой стенки коэффициентов теплоотдачи. Полученные результаты были сопоставлены с работами, ранее проделанными в данных областях [2, 3].

Литература

1. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективно-го теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. **Терехов В.И., Экаид А.Л.** Трехмерная ламинарная конвекция внутри параллелепипеда с нагревом боковых стенок // ТВТ. 2011. Т. 49. № 6. С. 905.
3. **Терехов В.И., Экаид А.Л.** Турбулентная свободная конвекция внутри параллелепипеда с нагревом двух противоположных вертикальных стенок // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 412.

Л.М. Усанова, А.С. Медведева, студенты;
рук. О.С. Попкова, доц., к.т.н. (КГЭУ, г. Казань)

РАСЧЕТ ДАЛЬНОБОЙНОСТИ ФАКЕЛА В НЕПОДВИЖНОМ ВОЗДУХЕ

Дальнобойность факела, образуемого при истечении топлива в неподвижный воздух из неподвижной форсунки, будем находить из основных уравнений баллистики капель. Длина пробега капель в неподвижном воздухе прямо пропорциональна их диаметру в степени 1,5, плотности топлива и корню из начальной скорости истечения. Если проинтегрировать от 0 до $x_{\text{ф}}$ и от v_0 до 0 и заменить скорость истечения ее значением из уравнения Бернулли, получим формулу для расчета дальнобойности факела [1]:

$$x_{\text{ф}} = \frac{8 \left(\frac{d_{\text{пр}}}{d_{\text{ср}}} \right)^{1,5}}{3a_{\text{к}} A_1^{1,5}} \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0,77} + \left(\frac{v_T}{v_0} \right)^{0,44} \right]^{1,5} \frac{R^{1,11} T_2^{1,11} \gamma_T}{p_2} \sqrt{\frac{k^{1,22} p_0 g^{0,22}}{\eta_2} \frac{d_{\text{ф}}^{1,5} \mu_{\text{ф}}^{1,5}}{v_0^{0,72}}}$$

В эту формулу входят только величины, которые могут быть непосредственно измерены или рассчитаны. При увеличении температуры воздуха, плотности топлива, диаметра и коэффициента расхода форсунки видимый факел удлиняется за счет ухудшения распыла, а при увеличении давления воздуха и скорости истечения топлива — укорачивается за счет улучшения распыла.

По результатам расчетов дальнобойности факела можно сделать вывод, что дальнобойность крупных капель больше, чем дальнобойность мелких при распыле в неподвижный воздух, и для изучения спектра распыла необходимо учитывать расстояние от факела, на котором проводится расчет. За счет увеличения размеров капель и уменьшения аэродинамических сил дальнобойность факела увеличивается, но распыл уменьшается.

Литература

1. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямооточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Для низкотемпературной дуговой плазмы (с температурой $\sim 10^4$ К) спектральная диагностика является единственным способом определения параметров среды, так как зондовые методы при таких температурах уже неприменимы. На рис. 1, 2 показаны спектр излучения аргоновой плазмы в диапазоне 700—800 нм, а также две близко расположенные линии AgI: 750,39 нм и 751,47 нм. Съемка проводилась четырехканальным спектрометром AvaSpec-2048.

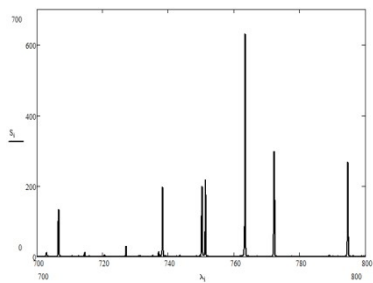


Рис. 1. Спектр излучения плазмы Ar

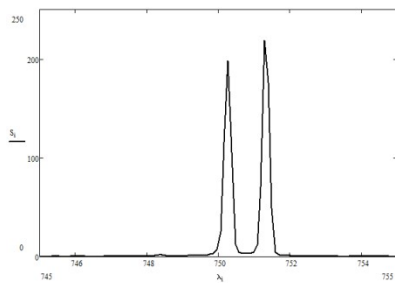


Рис. 2. Линии излучения Ag 701 нм и 751 нм

Как видно из рис. 2, две близко расположенные линии хорошо разрешаются нашим спектрометром (параметр ПШПВ которого для данного канала равен 0,26 нм). Таким образом, для определения параметров плазмы с помощью данной техники можно использовать не только интенсивности линий в максимуме, но и сами контуры (хотя аргоновая плазма для этой цели подходит не очень хорошо). С помощью измерения абсолютной интенсивности излучения дуговой плазмы, зная угловой коэффициент, можно оценить не только температуру, но и такой важный параметр, как радиус токопроводящего канала. Данный параметр можно определить через интенсивность излучения на различных длинах волн; например, для плазмы с $T = 9500$ К для линий 696,5, 763,5, 826,5 нм его вычисленное значение оказывается равным 1.37, 1.24 и 1.29 мм соответственно, что свидетельствует о весьма неплохой устойчивости метода.

А.А. Шкель, асп.; рук-ли Ю.В. Парфенов, д.т.н., доц.;
Д.Н. Герасимов, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБОПРОВОДА НА АЭС

Для расчета динамического воздействия от ударных волн, образующихся при разрыве трубопровода на АЭС с ВВЭР, в проектных и конструкторских организациях часто используется нормативно-техническая документация, в которой приводятся инженерные методики расчета, которые могут приводить к излишнему консерватизму при оценке воздействия. Альтернативным способом расчета воздействия ударных волн на элементы АЭС может быть моделирование с помощью многомерных расчетных программных средств. В ходе работы начата разработка расчетного программного средства для описания трехмерного нестационарного течения смеси неконденсирующийся газ – пар – вода. В математической модели предполагается, что среда, заполняющая помещения АЭС — термодинамическая равновесная смесь неконденсирующегося газа, пара и воды. Численное интегрирование уравнений основано на методе крупных частиц [1]. Выполнены тестовые сопоставительные расчеты для определения параметров среды в помещении при истечении пароводяной смеси из трубопровода в двумерной осесимметричной постановке. Результаты расчета находятся в разумном согласии с результатами работы [2].

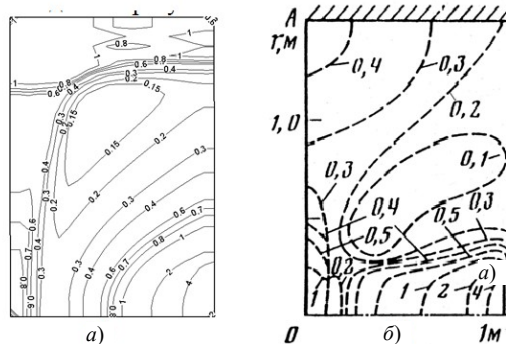


Рис. 1. Распределение давления в момент времени 0,044 с в расчете (а) и работе [2] (б)

Литература

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.
2. Расчет двумерного равновесного нестационарного истечения вскипающей воды / М.М. Гишинский, М.С. Индурский, Л.Н. Кан, Ю.В. Ржевников // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1981. № 4.

ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Председатель секции — д.т.н., профессор. А.П. Крюков

Секретарь секции — к.т.н., доцент П.В. Королёв

Е.В. Вишнеvский, асп.; рук. А.В. Бухаров, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ЖИДКИХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУЙ В СРЕДУ С НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Как часть технологического процесса инъекция жидких испаряющихся капиллярных струй в среду с низким давлением используется в энергетике, физике высоких энергий и нанотехнологиях [1].

Необходимо отметить, что при инъекции в среду с низким давлением поверхность жидкости оказывается сильно перегретой, и в результате интенсивного поверхностного испарения капиллярная струя быстро охлаждается и может замерзнуть.

Для подробного исследования влияния внешних условий на охлаждение капиллярных струй с использованием среды PHOENICS была разработана программа и проведены расчеты температуры поверхности тонких струй водорода и азота. В качестве примера на рис. 1. представлено изменения температуры поверхности струй азота при давлении в камере инъекции 100Па и скорости инъекции 10 м/с.

На основании полученных результатов показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней. В соответствии с расчетами при вводе в вакуум тонких жидких криогенных струй со скоростью превышающей 100 м/с струи на расстоянии до 1 мм не успевают замерзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счет испарения охлаждаются и становятся гранулами.

Высокоскоростные криогенные монодисперсные мишени обладают следующими преимуществами:

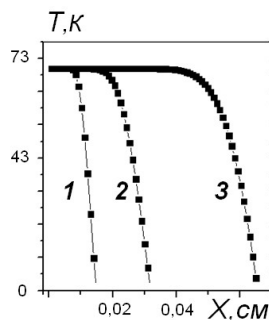


Рис. 1. Температура поверхности струй азота разного диаметра: 1 - $D = 5$ мкм; 2 - $D = 10$ мкм, 3 - $D = 0$ мкм

- непосредственный ввод в вакуум (нет необходимости в камере тройной точки и шлюзах),
- возможность использования оборудования кластерной мишени,
- возможность получения мишеней диаметром менее 20 мкм из различных криогенных жидкостей (H₂, D₂, N₂, Ar ...) с дисперсией меньше 1%,
- высокая скорость монодисперсных гранул (более 100м/с),
- точная синхронизация момента попадания гранулы в пучок с моментом включения датчиков.

Литература

1. **Бухаров А.В., Дмитриев А.С.** Криогенные корпускулярные мишени в энергетике. М.: Издательство МЭИ, 2013.

А.С. Должиков, асп; рук. В.И. Могорычный, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ В ДРОССЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА СМЕСЯХ

Одним из направлений повышения эффективности низкотемпературных циклов является применение многокомпонентных рабочих тел (МРТ). Однако на данный момент процесс кипения и конденсации МРТ недостаточно изучен [1]. Следствием этого является отсутствие универсальной аналитической зависимости, описывающей подобные процессы [2]. Все существующие методы носят полуэмпирический характер, и поэтому применимы только для конкретных условий.

Авторами настоящей работы проведен обзор работ по данной тематике [3] и осуществлено сравнение существующих методик расчета коэффициента теплоотдачи при кипении и конденсации смесевых хладагентов. Изложено подробное описание гомогенной модели: условий ее применимости, определения теплофизических свойств рабочего тела. Также дается подробное описание конструкции экспериментального стенда и методики проведения исследований по определению коэффициента теплоотдачи при кипении МРТ. Приводятся экспериментальные данные по исследованию процесса кипения смесевых хладагентов, а также производится сравнение их с расчетными значениями, полученными с использованием различных методик. Делаются выводы о возможности применения различных методик к описанию процесса кипения и конденсации МРТ.

Литература

1. **Asadi M., Xie G., Sunden B.A.** Review of heat transfer and pressure drop characteristics of single and two-phase microchannels // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 79.
2. **Yuan W., Zhen-guo W.** An overview of liquid-vapor phase change, flow and heat transfer in mini- and micro-channels // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Vol. 86.
3. **Sung-Min K., Issam M.** Review of databases and predictive methods for heat transfer in condensing and boiling mini/micro-channel flows // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 74.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ- КОНДЕНСАЦИИ

Решение задач испарения-конденсации методами механики сплошной среды предполагает задание корректных граничных условий на межфазной поверхности. Такие граничные условия могут быть получены, например, с использованием методов молекулярно-кинетической теории, основным уравнением которой является кинетическое уравнение Больцмана. Для решения этого уравнения необходима информация о функции распределения молекул по скоростям для молекул, движущихся от межфазной поверхности [1]. Одним из возможных подходов к нахождению функции распределения является использование методов молекулярной динамики. Полученная информация о координатах и скоростях отдельных частиц позволяет построить функцию распределения молекул по скоростям.

Так как процессы конденсации и испарения протекают неотделимо друг от друга, а частицы имеют хаотичное распределение скоростей как по модулю, так и по направлению, то в общем виде функция распределения летящих от межфазной поверхности частиц состоит из двух частей: первая описывает молекулы испарившиеся (f_e), а вторая – отразившиеся (f_r) от границы раздела фаз [2]:

$$f_+ = f_e + (1 - \beta)f_r,$$

где β — коэффициент конденсации.

Осуществляя наблюдение за треками отдельных частиц (рис. 1.), падающих на межфазную поверхность, можно выполнить расчет коэффициента конденсации для различных отношений температур пара и жидкости.

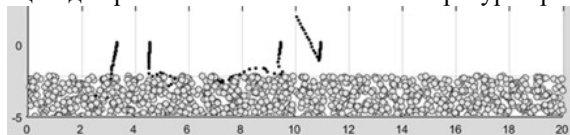


Рис. 1. Треки частиц газа над поверхностью жидкости

Литература

1. **Крюков А.П.** Процессы переноса в существенно неравновесных системах. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 124 с.
2. **Крюков А.П., Левашов В.Ю.** Молекулярно-динамическое моделирование процессов испарения и конденсации. Сравнение с кинетическими расчетами // Тр. XIV Минского Междунар. форума по теплообмену, Минск, 10–13 сентября 2012. Минск: ИТМО НАНБ, 2012. Т. 1., Ч. 2. С. 521—529.

*Д.А. Каревский, И.А. Ячевский, студенты; рук. П.В. Королёв, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ НЕ-II ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Использование сверхтекучего гелия (He-II) в условиях микрогравитации для охлаждения приборов, работающих при температурах, близких к абсолютному нулю, делает актуальным развитие технологий криостатирования на борту космических аппаратов. Знание закономерностей теплообмена при пленочном кипении необходимо для корректного расчета переходных процессов в системах криостабилизации, а также для оценки устойчивости последних к возмущениям. При решении сопряженных задач тепломассопереноса в различных двухфазных системах нужно иметь адекватные представления о процессах переноса как в каждой из контактирующих фаз, так и на их границе, т.е. на межфазной поверхности. К настоящему времени экспериментальных данных такого рода получено недостаточно.

В работе предпринята попытка интерпретации результатов экспериментов по изучению кипения He-II на поверхности цилиндрического нагревателя, расположенного внутри пористой оболочки. Эксперименты были выполнены на предназначенном для наземных испытаний опытном образце экспериментальной ячейки – прототипе устройства для проведения исследований в условиях микрогравитации [1]. Цель экспериментов состояла в доказательстве возможности использования пористой оболочки для стабилизации режима бесшумового пленочного кипения He-II в невесомости. Однако в экспериментах, вопреки ожиданиям, наблюдалась незамкнутая паровая пленка. После обработки экспериментальных данных было установлено, что они не совпадают с результатами, полученными в рамках ранее построенной модели кипения He-II внутри пористой структуры, так же как и с расчетами по модели Бромли для кипения обычных жидкостей. Можно предположить, что кипение в пористой структуре протекает при одновременном наличии нормального гелия (He-I) и He-II. Очевидно, что дальнейшие исследования должны быть направлены на создание математической модели, верно описывающей процессы кипения гелия-II в опытном образце экспериментальной ячейки.

Литература

1. Королёв П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2012. Т. 130. №5. С. 43—49.

Д.И. Климанский, Д.А. Долгих, студенты;
рук. В.И. Могорычный, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ЗАМЕНЫ ПОРШНЕВОГО ДЕТАНДЕРА ГЕЛИЕВОГО ОЖИЖИТЕЛЯ Г-45 ТУРБОДЕТАНДЕРОМ

Изучение гелия, а в частности его сверхтекучего состояния – важное направление научной деятельности кафедры низких температур МЭИ. Для непрерывного и своевременного обеспечения экспериментальных установок гелием в Криоцентре МЭИ был установлен ожижитель гелия Г-45. В данной работе рассмотрена возможность замены поршневого детандера данного ожижителя турбодетандером.

В современной криогенной технике все большее применение находят турбодетандеры — турбинные расширители. Они имеют ряд преимуществ перед поршневыми машинами: ротор не имеет соприкасающихся поверхностей, расширяемая среда не загрязняется смазкой, обеспечивается стабильная эффективность [1].

Проанализировав возможность замены поршневого детандера турбодетандером, можно сделать следующие выводы. Термогазодинамический расчет при рекомендуемых оптимальных геометрических параметрах дает [2] значение диаметра колеса турбодетандера 10 мм и частоту вращения ротора 460 тыс.об/мин. Современные гелиевые турбодетандеры проектируются так, чтобы максимальная частота вращения ротора не превышала 250 тыс.об/мин. Также известно, что при малых размерах проточной части значительное влияние на эффективность оказывает масштабный фактор (относительная величина зазоров в проточной части и относительная шероховатость [3]). На основании имеющихся в литературе данных [2] можно заключить, что при расходе гелия через турбодетандер, равном $m = 60$ кг/ч и степени расширения $\delta = 6-10$, эффективность турбинной ступени будет около 60 %.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что эффективное применение турбодетандеров в ожижителях гелия в настоящее время возможно только в установках производительностью не меньше 100 кг/ч.

Литература

1. Давыдов А.Б., Пересторонин Г.А., Стулов В.Л., Шерстюк А.Н. Центробежные турбодетандеры / под общ. ред. В.Н. Удута. М.: Изд-во «Колос-пресс», 2002.

2. Розенор Т.М. Расчет турбодетандера: методические указания по курсу «Турбомашин низкотемпературной техники». М.: Изд-во УНЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Криоконсул», 2002.

3. Калинин Н.В. Конспект лекций по курсу: Нагнетательные и расширительные установки. М.: МЭИ, 1974.

Д.И. Климанский, Д.А. Долгих, студенты;
рук. В.И. Могорычный, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕВАКУУМНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Метод определения среднеинтегрального значения коэффициента теплопроводности невакуумных низкотемпературных теплоизоляционных материалов для коммуникаций, арматуры и аппаратов низкотемпературной и криогенной техники, подверженных воздействию атмосферных факторов, основан на измерении в стационарном тепловом режиме постоянно теплового потока, устанавливаемого при определенной разности температур граничных поверхностей образца материала.

Тепловой поток измеряют по количеству испаряющейся жидкости замером расхода пара пузырьковым расходомером 14, и непосредственно взвешиванием прибора на весах 7.

Определение величины теплового потока таким методом связано с тремя основными допущениями: 1) тепло, притекающее к жидкости, расходуется только на ее испарение, а нагрева пара при этом не происходит; 2) отсутствует механический унос жидкости; 3) приток тепла к горловине пренебрежимо мал [1].

Возможность наблюдения влияния влажности воздуха на теплоизолирующие свойства материала является важной особенностью данного метода. Погрешность измерения теплопроводности не больше 5 %.

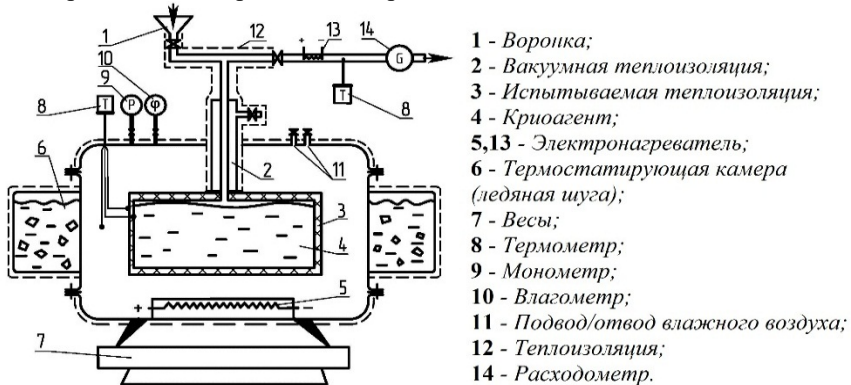


Рис. 1. Схема установки

Литература

1. КаганерМ.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.: Машиностроение, 1966.

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТОРОВ ГАЗОВЫХ МАШИН СТИРЛИНГА

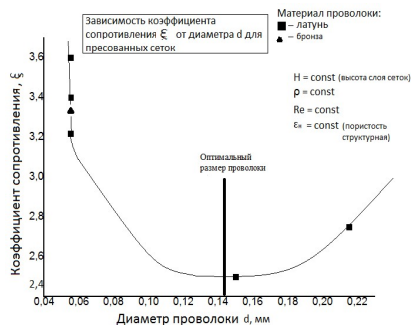


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления от диаметра проволоки

риков или в виде пористой массы с проходными каналами. В данной работе внимание акцентируется на конструкциях из сеток и сферических засыпках.

Для прессованных сеток, изготовленных из латуни ($\rho_M = 8550 \text{ кг/м}^3$) и бронзы ($\rho_M = 8750 \text{ кг/м}^3$) был проведен анализ и выполнены расчеты по формулам, взятым из [1]. При этом коэффициент сопротивления рассчитывался по соотношениям (1) и (2):

$$\text{при } 10 \leq Re \leq 40 \quad \xi = \left(\epsilon_n / \epsilon_{n,\text{ид.}} \right)^{1,35} \cdot 59 / Re^{0,74}, \quad (1)$$

$$\text{при } 40 \leq Re \leq 300 \quad \xi = \left(\epsilon_n / \epsilon_{n,\text{ид.}} \right)^{1,35} \cdot 19 / Re^{0,44}. \quad (2)$$

При анализе структуры сетки исходным параметром считаем диаметр проволоки сетки. Любая сетчатая структура имеет высоту H , количество сеток n_T и объемную массу M_1 . Зная M_1 и количество сеток n_T , можно определить m_1 (масса 1 м^2 сетки). Эти данные позволяют получить удельный свободный объем и рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления. Пример зависимости для прессованных сеток представлен на рис. 1. Видно, что при значении диаметра $d = 0,15 \text{ мм}$ гидродинамическое сопротивление будет наименьшим.

Литература

1. Микунин Е.И., Шевич Ю.А. Исследование процессов теплоотдачи в сетчатых насадках регенератора // Криогенное, кислородное машиностроение, 1972.

В.О. Майоров, студ.; рук. А.К. Ястребов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ЛАМИНАРНОЙ ДИФFUЗИОННОЙ КАМЕРЕ

Целью работы является расчет макропараметров конденсационного аэрозоля, сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и анализ влияния параметров ламинарной диффузионной камеры (ЛДК) на процесс объемной конденсации. Рассматривалось ламинарное течение парогазовой смеси в условиях теплообмена со стенками канала. Объемный расход, температуры сатуратора, подогревателя и конденсатора, а также общее давление заданы.

В первом приближении задача решалась в допущении о постоянстве параметров вдоль радиальной координаты. В качестве математического описания используются следующие уравнения: кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам [1], уравнения газодинамики для парогазовой смеси, уравнение баланса массы пара и жидкости и уравнение состояния идеального газа. Температура капель считалась равной температуре газовой фазы.

Расчеты проводились для смеси бутанола и гелия. В качестве результатов были построены зависимости различных параметров от продольной координаты, которые, в частности, показали, что увеличение температуры сатуратора приводит к увеличению массовой доли жидкости и возрастает дисперсность аэрозоля. Было выполнено сравнение с данными работы [2]. Получено качественное совпадение распределений параметров вдоль оси канала, а также довольно серьезное количественное расхождение скорости нуклеации. Причиной таких результатов являются приближенный характер формулы для расчета скорости образования новых капель и применение одномерного приближения. По всей видимости, пар, степень пересыщения которого достаточна для начала процесса зарождения ядер конденсации, находится вблизи оси канала, а не распределен по всему сечению. Целью дальнейших исследований является повышение точности расчетной модели за счет перехода к двумерной постановке задачи, а также учета конечной интенсивности межфазного теплообмена и других эффектов.

Литература

1. **Стернин Л.Е.** Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение. 1974.
2. **Trávníčková T., Havlica J., and Ždímal V.** Description of fluid dynamics and coupled transports in models of a laminar flow diffusion chamber // The Journal of Chemical Physics. 2013. Vol. 139. Num. 6.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГОРЯЧЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ С ОКРУЖАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

В последнее десятилетие в связи с развитием средств высокоскоростной визуализации существенно вырос интерес к экспериментальным исследованиям интенсивных быстротекающих процессов, в том числе происходящих при взаимодействии сильно нагретого тела и холодной жидкости. Большое внимание уделяется исследованию паровых пленок на поверхности горячих частиц.

Рассматривается задача о росте пленки пара на поверхности шарового нагревателя, который погружен в жидкость. При подаче тепловой нагрузки на поверхности нагревателя образуется паровая пленка. Над свободной поверхностью жидкости поддерживается постоянное давление. Необходимо найти зависимость размера паровой пленки от времени.

Для решения этой задачи была сформулирована система уравнений, которая решалась численно.

Уравнение Рэлея для проницаемой границы раздела фаз описывает динамику сферического парового зазора между частицей и окружающей жидкостью [1]. Давление воды вблизи паровой пленки связано с давлением пара около межфазной поверхности уравнением Лапласа [2]. Давление пара можно найти, проинтегрировав уравнение Менделеева–Клапейрона. Теплоперенос в паре описывается законом теплопроводности Фурье.

Получены зависимости радиуса и скорости роста паровой пленки от времени для задач с граничными условиями 1-го и 2-го рода. В обоих случаях имеет место колебательный процесс. Проведена оценка влияния массового потока на результаты. Для задачи с ГУ 2-го рода выявлено, что в уравнении Рэлея слагаемыми с массовым потоком можно пренебречь. Для задачи с ГУ 1-го рода отсутствие членов с потоком массы существенно: колебания радиуса пленки имеют меньшую амплитуду, но большую частоту.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-06145).

Литература

1. **Домбровский Л.А., Зайчик Л.И.** Динамика парового пузыря при тепловом взаимодействии горячей сферической частицы с окружающей водой // ТВТ. 2000. Т.38. с. 975–984.
2. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2000.

*А.С. Ракидин, асп.; рук. Э.П. Волков, д.т.н., проф.
(ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, Москва),*

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРИТОКА НА КОНВЕКЦИЮ В КРИОСТАТЕ С УЗКИМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Для работы электрооборудования на основе ВТСП (высокотемпературных сверхпроводников) требуется криостатирование СП элементов. В энергетике наиболее выгодно конвективное охлаждение жидким азотом. В ЭНИН разрабатывается система криообеспечения ВТСП трансформатора, обмотки которого помещены в тороидальные неметаллические криостаты [1]. Азотная полость с обмоткой в таком криостате представляет собой ряд узких вертикальных каналов. Для обеспечения надежной работы ВТСП обмоток необходимо знать температуру омывающей их криожидкости. Чтобы оценить влияние качества криостата на поля скоростей и температур криожидкости, численно исследуется система уравнений Обербека-Буссинеска для недогретого жидкого азота. Среди допущений: ламинарность течения, двумерная постановка. Задача решалась как нестационарная на основе алгоритма PIMPLE. Расчеты проводились с привлечением средств программного комплекса OpenFOAM.

В криожидкость теплота поступает от ВТСП обмоток и стенок криостата. Величина тепловыделений в ВТСП обмотках принята в соответствии с данными о разрабатываемом в ЭНИН первом в России ВТСП трансформаторе 1МВА [2], и полагается постоянной. Расчеты проводились для различных величин теплопритока в криостат от стенок.

Поскольку обеспечить высокие теплоизоляционные свойства неметаллического криостата технологически сложно, требуется выбирать оптимальную степень недогрева жидкого азота, такую, чтобы температура криожидкости не превышала заданного значения. Проведенное расчетное исследование позволяет решить эту задачу.

Литература

1. Система криообеспечения ВТСП трансформатора // Инновационные технологии в энергетике. Книга 3. Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость / Э.П. Волков, В.П. Фирсов, А.С. Ракидин и др.; под ред. академика РАН В.В. Костюка и академика РАН Б.И. Каторгина. М.: Наука, 2016.

2. **Первый** в России ВТСП трансформатор 1МВА, 10/0,4 кВ / Э.П. Волков, Э.А. Джафаров, Л.С. Флейшман и др. // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 3. С. 45—56.

*А.П. Стрельникова, студ.; рук. Ю.Ю. Пузина, к.т.н., ст. преп.
(НИУ «МЭИ»)*

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОПАДАНИИ ГОРЯЧЕГО ШАРА В ЖИДКОСТЬ

Паровой взрыв — резкое (за время порядка 1 мс) образование большого количества пара, сопровождающееся местным повышением давления, вследствие перехода тепловой энергии в механическую. Применительно к проблемам безопасности АЭС рассматривается паровой взрыв, возникающий при контакте расплавленного металла с жидким охладителем, имеющим относительно низкую температуру кипения. Это явление сопровождается взрывной фрагментацией расплава и образованием мощной ударной волны, амплитуда которой может достигать несколько тысяч атмосфер.

Рассматривается задача о динамике паровой пленки, образующейся около нагретой сферы при опускании ее в холодную жидкость. Пусть в начальный момент времени подается тепловая нагрузка и на поверхности нагревателя образуется паровая пленка, при этом над свободной поверхностью жидкости поддерживается постоянное давление. Необходимо найти зависимость размера паровой пленки от времени.

Для решения этой задачи была сформулирована система, в которую входят уравнения для скорости и ускорения межфазной поверхности.

Уравнение Рэлея для непроницаемой границы раздела фаз описывает динамику паровой пленки между частицей и окружающей жидкостью. Принимается, что теплоперенос в паровой пленке осуществляется теплопроводностью. Давление воды определяется гидростатической разностью. В то же время давление воды связано с давлением пара уравнением Лапласа. Давление пара можно рассчитать, применив неравновесное граничное условие для задач испарения-конденсации [1].

Получены зависимости радиуса и скорости роста паровой пленки от времени для задач с граничными условиями 2-го рода. Анализ полученных результатов показывает, что в рассматриваемой задаче возникают колебательные движения межфазной поверхности. Проведена оценка влияния величины теплового потока: чем больше величина теплового потока на нагревателе, тем больше максимальный радиус паровой пленки и тем медленнее происходит затухание колебаний. Но также установлено, что чем больше глубина погружения, тем меньше максимальный радиус паровой пленки и тем быстрее затухают колебания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-06145).

Литература

1. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** Механика двухфазных систем: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2000.

ПРИМЕНЕНИЕ АДСОРБЕНТОВ ДЛЯ ОСУШКИ ГАЗОВЫХ СРЕД

Освоение процесса адсорбции оказало большое влияние на развитие газовой промышленности, так как благодаря этому стало возможным эффективное и дешевое разделение газов, осушка газов, очистка газов от вредных примесей [1]. На сегодняшний день этот метод широко применяется в газовой промышленности, что позволило вывести ее на новый уровень, значительно улучшив качество сырья и продуктов, а также уменьшить энергозатраты на процесс разделения газов [2]. Заметно снизилась стоимость оборудования, которое используется в установках адсорбционного разделения и осушки.

В работе сделан обзор экспериментальных и теоретических работ по адсорбционной осушке на основе литературных источников. Рассмотрены существующие методы осушки газов и их смесей, а также проанализированы потенциальные выгоды от использования адсорбентов в криогенной технике. Представлены методы расчета адсорбционных установок и их технологическое оформление.

Проведено углубленное изучение цеолитов и силикагелей как наиболее часто используемых адсорбентов для осушки газовых сред. Подробно рассмотрены аспекты применения каждого из них в различных условиях. Также рассматривается обоснованность использования современных адсорбционных материалов в качестве альтернативы общеизвестным адсорбентам. На основании всех собранных и обобщенных данных сделаны выводы об эффективности адсорбционных материалов различного рода, проведено сравнение и изучены факторы применения каждого из них.

Разработана установка для осушки воздуха, которая может применяться как для проверки герметичности различных объемов и элементов криогенных систем, так и как рабочее тело в криогенных и низкотемпературных системах. Установка может использоваться в учебном процессе как лабораторный стенд.

Литература

1. **Серпионова Е.Н.** Промышленная адсорбция газов и паров. М.: Высшая школа, 1969.
2. **Кельцев Н.В.** Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984.

ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Поиск зависимостей для расчета термодинамических свойств технически важных жидкостей является крайне актуальной задачей. В настоящей работе исследована задача определения термодинамических свойств жидкостей, на примере этилового спирта. Проводился расчет, в котором использовались температурные зависимости плотности, изобарной теплоемкости и скорости звука при атмосферном давлении. Зависимости этих свойств от температуры, полученные методом наименьших квадратов, представляют собой полиномы следующего вида:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i \left(\frac{T}{100} \right)^i, \quad y = \{\rho, C_p, W\}, \quad (1)$$

где ρ — плотность, кг/м^3 ; C_p — изобарная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; W — скорость звука [1]; a_i — коэффициенты полиномов, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (1) для жидкого этилового спирта

	ρ	W	C_p
a_0	517,704	45,09726	-2,583309
a_1	313,289	99,35517	0,6605089
a_2	-64,51434	90,86134	0,09552845
a_3	-3,406603	7,999231	0,1509414
a_4	-1,819172	-0,1289411	0,02588675
A_5	0,672788	-0,6065469	-0,01610834

Работа показывает, что высокой точности определения термодинамических свойств жидкостей можно достичь именно при использовании данных о скорости звука [2]. Планируется разработать методику получения термодинамических уравнений состояния жидкостей.

Литература

1. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
2. **Охотин В.С.** Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование технически важных жидкостей с целью создания уравнений и таблиц теплофизических свойств высокой точности: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1987.

Секция 42

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Председатель секции — зав. каф. НТ, д.т.н., профессор.

А.С. Дмитриев

Секретарь секции — магистрант И.А. Лашков

И.А. Алексеев, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ В РЕЖИМЕ «ПРЫГАЮЩИХ ПУЗЫРЕЙ»

В процессе изучения кипения было установлено, что существует точка по температуре, когда процесс естественной конвекции в воде, над слоем микросфер сменяется режимом начала генерации газовых или паровых пузырей (режим нуклеации). При этом установлена средняя температура, когда этот режим начинается — температура начала нуклеации — T_N . Эта температура сначала была привязана к температуре поверхности нагревателя и составляла для зарождения нуклеации величину около $T_h \approx 180$ — 200 °С. При этом температура на дне бокса варьировалась около величины $T_w \approx 80$ — 85 °С. Рост пузырей при таких условиях означает, что, несмотря на использование дистиллированной воды, в ней, по-видимому, был растворен воздух, что приводило к генерации в начальной стадии кипения газовых (воздушных) пузырьков [1].

В ходе работы была проведена серия опытов при различных условиях. Был проведен сравнительный анализ обычного пузырькового кипения воды и кипения в режиме «прыгающих пузырей» с использованием микросфер при одинаковых условиях. Сначала внутрь стеклянного контейнера помещались монодисперсные микросферы сплава Pb95%+Sb5% [2]. Затем наливалась дистиллированная вода, уровень которой превышал в 500—1000 раз диаметр микросфер. Бокс закрывался крышкой и ставился на нагреватель, температура которого могла меняться в широких пределах. Для нагрева бокса до температуры, необходимой для начала появления пузырей, уходило около 20 минут. Результатом анализа является выявление различной скорости роста температуры воды от поверхности до дна бака. Целью дальнейших экспериментов является определение роли растворенных газов при возникновении режима «прыгающих пузырей».

Литература

1. Дмитриев А.С., Макаров П.Г., El Bouz М.А. О новом режиме пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (эффект прыгающих пузырей) // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 6.

2. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. 736 с.

Д.Н. Артеев, студ.; рук. А.А. Батраков, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СКРЕТЧ-ТЕСТИРОВАНИЯ

В энергетике широкое распространение получили защитные покрытия. Для определения и контроля качества наносимых покрытий и обеспечения возможности улучшения их свойств необходимо проведение лабораторных измерений. Для решения многих задач упрочнения элементов оборудования ТЭК, например повышения эрозионной и коррозионной стойкости, снижения коэффициента трения, необходимо получать плотные беспористые покрытия.

Исследование защитных покрытий и измерение их механических свойств проводилось на приборе CSM Instruments «Nano-Scratch Tester», модуле для проведения измерительного царапания, исследования износа и профилометрии (рис. 1) [1].

Исследование послойного состава было выполнено методом тлеющего разряда. Для измерения адгезии на различных глубинах был подготовлен образец с помощью спектрометра, при этом были выполнены прожиги различной длительности [2].

В работе были представлены критические нагрузки защитного покрытия на поверхности и на различных глубинах, а также подложки из стали 20Х13, на которую было нанесено покрытие.

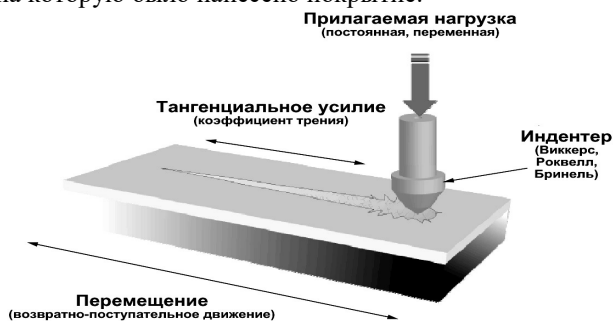


Рис. 1. Схема проведения исследования покрытия методом склерометрии

Литература

1. Селиванов К.С., Смыслов А.М., Петухов А.Н. Исследования свойств вакуумно-плазменных покрытий методом склерометрирования на установке SCRATCH TEST. // Вестник УГАТУ. 2011. № 4.
2. Левашов Е.В. Обеспечение единства измерений физико-механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей. [Электронный ресурс] // Мир гальванотехники. URL: www.GalvanicWorld.com.

Д.Д. Бабенко, студ.; рук. И.А. Михайлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
науч. конс. С.А. Ромашевский (ОИВТ РАН)

ПРОЦЕССЫ СМАЧИВАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В работе представлено исследование в области фемтосекундного лазерного структурирования. Фемтосекундными лазерными импульсами (ФЛИ) проведена модификация поверхностей кремния, в результате которой получена два экспериментальных образца [1]. Проведен сравнительный анализ гидродинамических и теплофизических свойств модифицированного кремния по сравнению с полированным кремнием [2].

Цель работы – изучение свойств модифицированного кремния для получения гидрофобных и гидрофильных поверхностей. Знание физико-химических свойств такого рода наноструктурированных поверхностей перспективно для микро- и нанофлюидики, биомедицины и многих других областей [3].

В работе содержатся методики и схемы экспериментальных установок для получения и анализа поверхностей, модифицированных ФЛИ, и результаты проведенных исследований [4]. Часть полученных результатов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Изменения свойств модифицированного Si в сравнении с полированным Si

	Угол смачивания	Время испарения	t ⁰ Лейденфроста
ДО НАГРЕВА			
Si обр.1(полиров.)	54.8°	х	180°С
Si обр.2	71.3°↑		
Si обр.3	70.8°↑	↓	190°С↑
ПОСЛЕ НАГРЕВА			
Si обр.1(полиров.)	74.1°		180°С
Si обр.2	93°↑	↑	170°С↓
Si обр.3	91.6°↑	↑	170°С↓

Литература

1. **Крюков П.Г.** Фемтосекундные импульсы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 208 с.
2. **Дмитриев А.С., Михайлова И.А.**, Физико-химия наноструктур: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 240 с.
3. **Дмитриев А.С.** Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 790 стр. : ил.
4. **Vorobyev A.Y. and C. Guo** // Laser Photonics Rev. 7. 2013. No 3. 385–407.

*А.М. Байманова, студ.; рук. И.А. Михайлова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
науч. конс. Д.В. Болтунов, инж.
(АО «Российские космические системы», Москва)*

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ ПОЛИИМИДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ МЕМБРАН В УСЛОВИЯХ ГАЗОВОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ В МИКРОАЗОРЕ

Характеристики механических устройств микросистемной техники (УМСТ) емкостного типа: количество циклов срабатывания, быстродействие, управляющее напряжение – сильно зависят от свойств основного элемента конструкции исполнительного механизма УМСТ – чувствительного элемента (ЧЭ) и технологии изготовления [1]. Типовой ЧЭ УМСТ является подвешенной слоистой мембраной микронной или субмикронной толщины, изготовленной по многоуровневой технологии поверхностной микрообработки с применением прецизионных методов физического и химического осаждения, химического травления и литографии, перемещающейся в микроазоре под действием внешнего управляющего воздействия. Нескомпенсированные (после удаления жертвенного слоя при изготовлении ЧЭ) внутренние напряжения и газовое демпфирование в подкорпусной среде УМСТ существенно влияют на свойства ЧЭ, в связи с этим исследование динамики свободно подвешенных ЧЭ актуально в приложениях СВЧ и фотоники.

Целью работы являлось изучение и определение влияния газового демпфирования в подкорпусной среде УМСТ на свойства УМСТ в части определения и сравнения механических свойств (изгибная жесткость, энергия упругой деформации и др.) подвешенных ЧЭ и аналогичных слоистых структур на жестком основании.

Объектом исследования служили образцы полиимидно-алюминиевых мембран ЧЭ диаметром 150 ± 20 мкм и толщиной 1,8—3,5 мкм. Образцы исследовали методом наноиндентирования. Параметры проведенных однофакторных экспериментов: внешняя механическая нагрузка на поверхность ЧЭ — 0,5—50 мН; перемещение ЧЭ – 1—5 мкм; давление в подкорпусной среде — 10^3 - 10^5 Па.

Полученные результаты позволяют обоснованно применять метод наноиндентирования для исследования подвешенных микроструктур и могут быть использованы при разработке механических УМСТ.

Литература

1. **Варадан В., Виной К., Джозе К.** ВЧ-МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 661 с.

А.Р. Валеев, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Постоянное совершенствование микро- и оптоэлектронных приборов, бурное развитие компьютерной техники приводят к увеличению теплотонапряженности таких элементов, как микропроцессоры, что может привести к перегреву и нестабильной работе при использовании традиционных систем охлаждения. В связи с этим выделяемую тепловую энергию следует отводить надежной системой охлаждения, причем ее габаритно-массовые характеристики должны быть соизмеримы с данным устройством [1]. Но подобрать надежную и эффективную систему отвода тепла от компонента микроэлектроники одно дело, а ведь также необходимо данное тепло эффективно передать этой самой системе. Тут то и возникают новые проблемы, касающиеся теплоотвода.

Решить данную проблему позволяют различные многокомпонентные системы, использующиеся в качестве термоинтерфейсов, состоящие из базового материала и наноэлементов, внедренных в него, называемые нанокompозитами [2].

В настоящей работе по охлаждению устройств микро- и оптоэлектроники используются нанокompозиты на базе наноалмазов, графена, углеродных нанотрубок и других нанокompозитных материалов. Проблема их использования заключается в том, что неизвестны значения теплопроводности данных материалов. И поэтому первым шагом исследований является определение значений теплопроводности используемых нанокompозитов. Для измерения использовался метод лазерной вспышки (Laser Flash Analysis, LFA), самый современный и точный метод на данный момент. Принцип метода лазерной вспышки заключается в равномерном облучении поверхности небольшого образца коротким лазерным импульсом.

Целью исследований является определение наиболее теплопроводного нанокompозитного материала для дальнейшего использования в качестве термоинтерфейса для охлаждения микро- и оптоэлектронных устройств.

Литература

1. **Коновалов Д.А.**, Дроздов И.Г., Лазаренко И.Н., Шматов Д.П., Моделирование процессов гидродинамики течения охладителя в наноструктурах на основе нитевидных кристаллов кремния // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. №3.

2. **Дмитриев А.С., Михайлова И.А.** Физико-химия наноструктур: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2013. 240 с.: ил.

А.А. Дмитриев, асп.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЯХ ПРОВОДЯЩИХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Вопрос о влиянии примесей на проводимость и пробой жидких диэлектриков достаточно подробно изучен в работах [1,2]. Тем не менее, процессы, происходящие в области высоких концентраций проводящих частиц являются темой, требующей дальнейшего изучения. Это может иметь значение для изучения электрического пробоя и создания новых методик химического синтеза и получения наноматериалов.

Целью нашего исследования было исследовать процессы, происходящие в концентрированных суспензиях проводящих частиц в диэлектрической жидкости и выявить особенности поведения исследуемой системы в зависимости от внешних условий. Нами были произведены опыты с взвесями цинковых и графеновых частиц в изопропиловом спирте.

Было выявлено, что в таких системах диэлектрическая жидкость может проводить ток без обнаружимых признаков разрядов. Их поведение сильно зависит от температуры смеси и условий теплоотвода. Выявлены сложные вольт-амперные характеристики протекания тока.

Зависимость равновесной с окружающей средой температуры смеси от пропускаемого через ячейку тока, при заданной температуре окружающей среды имеет экспоненциальный вид.

В ходе пропускания тока через суспензию наблюдается появление пузырьков пара. При достижении взвесью температуры кипения в ней начинают наблюдаться микроразряды. Электросопротивление при этом скачкообразно возрастает. В режимах с плазмообразованием наблюдается синтез наночастиц и ароматических веществ.

Для взвесей микрочастиц, где наблюдается высокая седиментация, возможно выделить несколько режимов пропускания тока, для которых управляющими параметрами является ток и температура термостата. На ВАХ наблюдается вертикальный участок, где множеству значений тока соответствует одно и то же напряжение.

Литература

1. **Ушаков В.Я.** Импульсный электрический пробой в жидкостях. Томск: Изд. Томского университета. 1975.
2. **Новиков Г.Ф.** Явления переноса. Электропроводность в диэлектриках: учебное пособие. Воронеж-Черноголовка: ВГУ, 2000.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Работа посвящена изучению свойств лиофильности/ лиофобности поверхности различных материалов. Цель работы – в исследовании краевых углов смачивания и растекания капель простых и коллоидных жидкостей по геометрически неоднородным поверхностям образцов алюминия и кремния. Такого рода наноструктурированные поверхности применяются в приборах и аппаратах энергетики и промышленности [1].

В работе использованы аппаратно-программный комплекс EasyDrop KRUSS, методика измерения краевых углов смачивания поверхностей каплями рабочих жидкостей при комнатной температуре. Изучены особенности смачивания геометрически неоднородных поверхностей анодированного алюминия и монокристаллического кремния некоторыми простыми жидкостями и коллоидными растворами (дисперсионная среда – вода) разных концентраций дисперсной фазы с размером частиц 7 мкм. Полученные данные указывают, что алюминиевая подложка является гидрофильной по отношению ко всем исследуемым жидкостям и смесям и имеет наибольший угол смачивания $\theta = 71,1^\circ$ по отношению к воде (табл. 1), а также оказалось, что с увеличением концентрации коллоидного раствора углы смачивания гладких поверхностей растут сначала незначительно до определенного предела концентрации, после которого резко возрастают, но их измерение затруднено из-за медленного растекания капли [2].

Таблица 1

Образец \ жидкость	Спирт этиловый, 96%	Дистиллиров. вода	Глицерин 20%- дист.вода	Глицерин 40%- дист.вода	Глицерин 60%- дист.вода	Глицерин 100%
Al обр.№780 (Semi Spectural)	12,0±0,6	66,9±0,2	61,1±1,0	58,9±1,4	56,8±0,2	55,0±0,6
Al обр.№ 620G (Matt)	10,8± 0,3	67,7±0,4	63,8±1,3	59,2±0,7	56,0±0,6	55,8±0,5
Al обр.№ 690G (Metalic Fine)	15,8± 0,4	71,1±0,2	68,7±0,6	62,8±0,9	60,6±2,1	57,7±0,8

Литература

1. Дмитриев А.С., Михайлова И.А. Физико-химия наноструктур. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 240 с.: ил.
2. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства, применение. // Успехи химии 77 (7), 2008. С. 619—638.

И.А. Лашков, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ФОРМИРОВАНИЕ КАПЕЛЬ МНОГОФАЗНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛАХ

Микрофлюидика, или по-другому микрогидродинамика — это междисциплинарная наука, занимающаяся изучением поведения жидкости с размерами капель меньше чем один микролитр. Это сравнительно новые технологии использующие микроканалы с размером от десяти до тысячи микрометров благодаря чему для проводимости используется очень маленькие объемы вещества [1]. Сравнительно маленький диаметр микроканалов позволяет осуществлять определение веществ с высокой точностью и разделять жидкости на отдельные молекулы в зависимости от времени и положения в микроканале.

Целью экспериментов является формирование микрокапель с использованием в качестве основного вещества полидиметилсилоксан, который широко используется в микрофлюидике благодаря простоте фабрикации, экономичности и таким физическим свойствам как светопроницаемость, низкой автофлуоресценции и низкой газопроницаемости. В работе был проведен анализ зависимости формы капли воды от скорости воды и потоков масла в микроканале. На рис. 1 представлено описание формирования капли в микроканале помощью устройства T-junction.

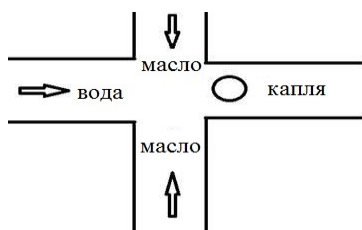


Рис. 1. Схема формирования капли в микроканале

Данная работа имеет широкое применение в струйной печати, в химическом синтезе, в молекулярной биологии и в так называемых лабораториях на чипе (lab on a chip) [2, 3], иначе называемых микросистемами полного анализа, позволяющих осуществлять несколько многостадийных химических процессов на одном чипе, не превышающем размера в несколько квадратных сантиметров.

Литература

1. Whitesides, G. M. The origins and the future of microfluidics. *Nature* 442, 368-373 (2006).
2. Stone H.A., Sroock A.D., Ajdari A. Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-in-a-chip // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2004. 36. P. 381—411.
3. **Microfluidic** lab-on-a-chip platforms: requirements, characteristics and applications / D. Mark, S. Haeberle, G. Roth et al. // *Chem. Soc. Rev.* 2010. 39. P. 1153—1182.

П.Г. Макаров, асп.; рук-ли А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
П.И. Алтухов, инж. (НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТИРОВАННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОДИНОЧНЫЕ КАПЛИ

В работе описано экспериментальное исследование воздействия лазерного излучения на одиночные капли коллоидных растворов наночастиц. В качестве основы для растворов использовались вода, глицерин, спирт, в том числе с включениями кристаллов поваренной соли, свинцовых микросфер. Экспериментальный стенд состоит из стеклянной подложки, на которую наносятся капли при помощи микродозатора, синего лазера 450 нм, фиксируемого на предметном столе с возможностью варьирования ориентированности луча относительно подложки. При разработке методики авторы ориентировались на известные работы [1].

Как показали опыты, при воздействии лазерного луча на капли некоторых жидкостей, в частности коллоидного раствора наночастиц Fe_2O_3 , контактная линия их смещается наружу в сторону увеличения площади основания капли [2]. Характер и интенсивность смещения отличается для двух вариантов ориентированности луча относительно капли (рис. 1).

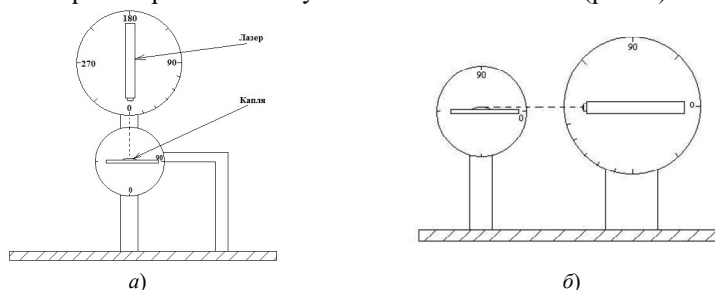


Рис. 2. Схемы воздействия лазерного луча на капли: а — вертикальная ориентированность; б — горизонтальная ориентированность

С помощью просвечивающего микроскопа были получены снимки следов капель вследствие движения наножидкости. Проводилась количественная оценка воздействия лазера на жидкость путем измерения максимального расстояния смещения контактной линии. Изменялось изменение температуры капли.

Литература

1. Shin J.Y. and Abbott N.L. Using light to control dynamic surface tensions of aqueous solutions of water soluble surfactants // *Langmuir* . 1999. 15. 4404.
2. Макаров П.Г. О воздействии сфокусированного синего лазерного излучения на капли различных жидкостей // Сборник докладов VI Всероссийской конференции по наноматериалам, 2016.

А.О. Макарова, студ.; рук. О.С. Зуева, к.ф.-м.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)

МИКРООКРУЖЕНИЕ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

Углеродные нанотрубки являются перспективными материалами для создания различных устройств, в том числе для мягкой электроники, а также в фотонике и оптоэлектронике. Получение стабильных суспензий углеродных нанотрубок в водных дисперсиях поверхностно-активных веществ (ПАВ) дало возможность варьирования электронных и фотофизических характеристик нанотрубок посредством изменения микроокружения, создаваемого молекулами ПАВ. Изучению возможностей направленного формирования микроокружения и способов его изменения посвящена данная работа. Образование адсорбционного слоя, создаваемого на поверхности углеродных нанотрубок при их диспергировании в растворах ряда додецилсульфатов (натрия, лития и цезия), было исследовано нами методом ЯМР в работе [1]. Было показано, что в водных растворах додецилсульфатов натрия и лития доминирует мицеллярная самоорганизация молекул ПАВ на поверхности нанотрубок, однако вид мицеллярных образований зависит от природы противоионов.

В данной работе методом инфракрасной спектроскопии проведено экспериментальное изучение возможностей управления свойствами локального окружения углеродных нанотрубок за счет изменения структуры мицеллярных образований ПАВ при добавлении внешнего электролита – солей различных щелочных металлов (Li, Na, Rb, Cs). При исследовании инфракрасных спектров поглощения дисперсий углеродных нанотрубок в присутствии ПАВ и солей щелочных металлов в диапазоне частот от 1000 см^{-1} до 3000 см^{-1} были обнаружены изменения структуры мицелл, зависящие от вида используемого электролита. Выявлено, что добавление солей приводит к более плотной упаковке молекул ПАВ в мицеллы, причем к наиболее высокоупорядоченному состоянию приводит добавление солей рубидия. Изменение морфологии мицелл дает возможности управления характеристиками локального окружения углеродных нанотрубок и в конечном итоге электронными и фотофизическими свойствами углеродных нанотрубок путем варьирования внешнего электролита. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-97055-р_поволжье_a).

Литература

1. Borovskaya A.O., Idiyatullin B.Z., Zueva O.S. Carbon nanotubes in the surfactants dispersion: formation of the microenvironment // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Vol. 690. No 012030.

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

В настоящее время на практике широкое распространение получили различные модификации методов электронно-лучевого испарения, магнетронного распыления, ионной имплантации для формирования покрытий в вакууме и инженерии. В качестве основного метода для формирования покрытий был выбран метод магнетронного распыления [1].

В данной работе исследование защитных покрытий и измерение их механических свойств проводилось на приборе сканирующий нанотвердомер «НАНОСКАН-3D». Исследование поверхности основано на принципе: измерения зависимостей глубины внедрения индентора от приложенной нагрузки в заданных точках поверхности [2]. Схема эксперимента и методика его выполнения показаны на рис. 1.

Целью экспериментов является проведение измерений механических свойств защитного покрытия на поверхности и на различных глубинах методом наноиндентирования. Основные расчетные механические свойства: твердость и модуль упругости (Юнга). Кроме того, проводилось исследование послойного состава защитного покрытия методом опико-эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда.

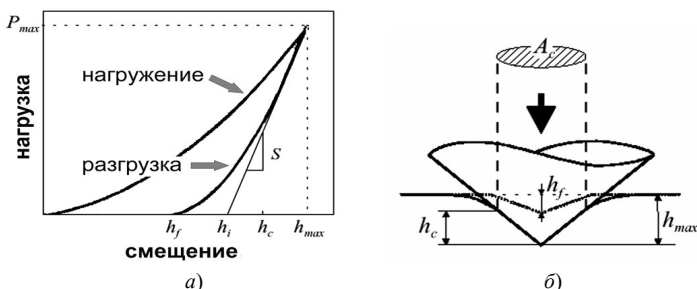


Рис. 1. Алгоритм измерения твердости методом наноиндентирования: а — кривая нагружение-внедрение $P(h)$; б — схема измерения кривой $P(h)$

Литература

1. Качалин Г.В., Рыженков А.В. Современные технологические решения для формирования ионно-плазменных покрытий на элементах оборудования топливно-энергетического комплекса // Надежность и безопасность энергетики. 2014. №2(25).
2. Нанотвердомер сканирующий НАНОСКАН-3D. Руководство по использованию. 2013.

А.В. Соколов, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МИКРОСФЕР НА ВРЕМЯ ЗАКИПАНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ

В настоящее время хорошо исследованы и изучены кипение и другие физические процессы жидкости в горизонтальных и вертикальных каналах [1], [2]. Однако кипение жидкости в вертикальном канале с различными засыпками изучено недостаточно, а также недостаточно визуализировано. В данной работе создан экспериментальный стенд для исследования и наблюдения кипения жидкости в вертикальных каналах, позволяющий производить разные засыпки и разные концентрации жидкости и засыпаемого вещества. Стенд и его описание представлены на рис. 1. В проведенных опытах использованы полидисперсные микросферы, а также жидкости с нанокolloидами и флуоресцентами. Жидкость наливалась в вертикальный канал, представляющий из себя стеклянную трубку, после чего засыпались микросферы, и начиналось нагревание смеси. Во время эксперимента производилось измерение скорости закипания смеси, а также наблюдение за поведением трехфазной смеси пар-жидкость-микросферы.

Целью экспериментов является изучение и наблюдение влияния микросфер на кипение жидкости в канале, наличие в жидкости нанокolloидов и флуоресцентов, а так же измерение времени закипания жидкости.

Данная работа позволяет смоделировать работу микротрещин на атомных электростанциях.

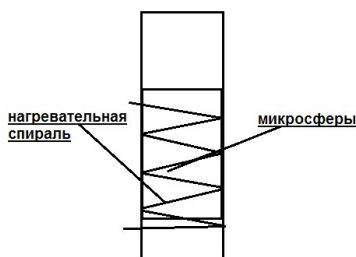


Рис. 1. Схема установки

Литература

1. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
2. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах.// Научн. журн. НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 3.

*В.Е. Соломко, студ.; рук-ли Ю.А. Волков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
А. Димитрова, д.т.н., асс. (ТУ Ильменау, Германия)*

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КАТОДОВ В ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЯХ

Элементы питания с литий-ионной технологией обеспечивают в настоящее время самую высокую удельную энергию и мощность среди всех аккумуляторных батарей. Данные об энергии и мощности зависят от используемых компонентов батареи и определяют возможности их применения в различных областях. Предметом актуального исследования новых технологий хранения является получение новых катодных материалов с повышенной энергией и мощностью [1], [2].

В последнее время чаще всего в производстве коммерчески применяемых литий-ионных батарей в качестве катодных покрытий используются LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ (так называемые NMC-материалы), LiMn_2O_4 . Эти соединения отличаются своей кристаллической структурой, которая влияет на скорость транспортировки ионов лития [3].

В ходе работы были синтезированы оксиды переходных металлов (NMC материалы) на основе лития, никеля, марганца, кобальта с примесью титана, алюминия и железа. Целью работы было выяснить, смогут ли примеси повлиять на стабильность структуры и электрохимические свойства материалов.

Исследование кристаллографических свойств полученных материалов проводилось при помощи дифрактометра Siemens D5000. Более точный структурный анализ был проведен с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на установке Omicron.

В работе были представлены параметры кристаллических решеток, сравнение полученных с помощью РФЭС спектров и электрохимические свойства синтезированных материалов. Результаты исследования показали, что наиболее перспективными электрохимическими свойствами и высокой стабильностью материала обладает богатая никелем структура, легированная небольшим количеством титана — $\text{LiNi}_{0,6}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,2}\text{Ti}_{0,02}\text{O}_2$.

Литература

1. **Hayner C.M., Zhao X. & Kung H.H.** Materials for rechargeable lithium-ion batteries. // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2012. 3. 445—471.
2. **Goodenough J.B. & Park K.S.** The Li-ion rechargeable battery: A perspective // Journal of the American Chemical Society. 2013. 135. 1167—1176.
3. **El Mofid W., Ivanov S., Konkin A., Bund A.** A high performance layered transition metal oxide cathode material obtained by simultaneous aluminum and iron cationic substitution. TU Ilmenau, May 2014.

Д.А. Юнусбаев, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА СВОЙСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ НАГРЕВЕ ИМИТАТОРОМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При сжигании природных топлив (уголь, нефть, газ) на тепловых электростанциях выбрасывается большое количество диоксида углерода, что ведет к парниковому эффекту. На фоне этих проблем растет интерес к возобновляемым источникам энергии. Из двух направлений солнечной энергетики наиболее экономически выгодной является солнечная теплоэнергетика. Концентратор солнечного излучения фокусирует солнечные лучи на приемнике, где находится теплоноситель (вода, масло и т.д.) которая используется для получения пара. Недостаток такой системы — низкий коэффициент поглощения, эффективность преобразования воды в пар невысокая. Один из вариантов повышения эффективности — это использование наножидкости в качестве теплоносителя. Такой вывод обосновывается исследованиями теплофизических свойств наножидкостей, показавшими у жидкости с наночастицами значительное увеличение теплопроводности по сравнению с чистой жидкостью [1].

Цель работы – определить изменение степени поглощения и время нагрева разных жидкостей при добавлении наночастиц.

Задачи наших экспериментов: 1) исследования с неподвижной жидкостью; жидкости определенного объема (обычная и наножидкость) будут нагреты имитатором солнечного излучения вместо концентратора. Это покажет, какая из них быстрее нагреется до заданной температуры. Проведенные в настоящее время эксперименты, в которых сравнивались времена нагрева дистиллированной воды и коллоидной наножидкости (дисперсная фаза – наночастицы алмаза размером 5 нм), показали, что наножидкость до 100 °С нагревается быстрее воды. 2) Далее будут исследованы другие теплоносители (масло, раствор глицерина в воде). 3) Затем планируется изготовить контур с минитурбиной, по которому будет циркулировать пар. Планируются измерения расхода пара, температуры и оценка эффективности наземного преобразования солнечной энергии. Наше исследование станет продолжением работы [2], где расчеты показали, что переход от воды к наножидкости позволит увеличить КПД устройств на 30 %.

Литература

1. Дмитриев А.С., Михайлова И.А. Физико-химия наноструктур. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 131 с.
2. Tiwari A.K., Ghosh P., Sarkar J. Solar water heating using nanofluids – a comprehensive overview and environmental impact analysis. International Journal of Engineering Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3 (3). P. 221—224.

Направление
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —

зав. каф. АСУ ТП, д.т.н.,
профессор А.В. Андриюшин

Секция 43

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Председатель секции — д.т.н., проф. В.Б. Тупов
Секретарь секции — аспирант Д.А. Розанов

М.С. Банакин, Г.А. Мальцев, студенты; рук. С.А. Семин, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО СНИЖЕНИЯ ШУМА ОТ КОТЕЛЬНОЙ

При эксплуатации котельных, которые широко применяются для обеспечения тепловой энергией жилых и общественных зданий населенных пунктов, а также промышленных предприятий, необходимо принимать во внимание негативные антропогенные факторы, характерные для подобных объектов малой энергетики. Одним из таких физических воздействий на окружающую среду является шум.

В настоящее время для уменьшения шумового воздействия от оборудования котельных используют различные типы глушителей, звукопоглощающие экраны и другие устройства [1]. Одним из основных требований к элементам защиты котельных от шума является достижение ими требуемой акустической эффективности. При установке подобных устройств не должно происходить уменьшения теплопроизводительности котлов и возникать препятствий для эксплуатации энергообъекта.

Рассматриваемая в данной работе котельная расположена в жилом районе в непосредственной близости от жилых зданий, в связи с чем возникает проблема повышенного шумового воздействия в окружающем районе. Для котельной характерен круглосуточный режим работы, поэтому санитарные нормы по фактору шума [2] должны соблюдаться как в дневное, так и в ночное время.

Для определения требуемого снижения шума от котельной необходимо произвести измерения уровня шума на территории котельной и в окружающем ее жилом районе в дневное и ночное время суток при различных режимах ее работы: от режима с полным отключением котельной до режима ее работы при максимальной нагрузке. Далее проводится сравнение

полученных результатов с санитарными нормами [2], а анализ полученных результатов измерений позволяет определить требуемое снижение шума от источников шума котельной.

После определения необходимого снижения шума от источников разрабатываются шумозащитные мероприятия с целью снижения уровня шума до санитарных норм в окружающем котельную районе.

Литература

1. **Тупов В.Б., Семин С.А., Тараторин А.А., Тупов Б.В.** Комплексное снижение шума от котельных малой мощности // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 61—65.
2. **СН 2.2.4/2.1.8.562-96.** Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.

*Е.А. Бетуганова, студ.; рук. М.С. Иваницкий, к.т.н.
(филиал МЭИ в г. Волжском)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ СЖИГАНИЯ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Основу российской электроэнергетики составляют тепловые электростанции (ТЭС), использующие в качестве топлива природный газ, мазут и уголь (антрацит, бурый, каменный, тощий). Сжигание топлива, в особенности угля, приводит к выбросу большого количества золовых и коксовых частиц. Нормативный уровень концентраций твердых частиц в дымовых газах пылеугольных котлов не должен превышать 150 мг/м^3 , согласно европейскому законодательству — не более 50 мг/м^3 , причем для энергоблоков на суперсверхкритических параметрах прогнозируемый уровень концентрации твердых частиц не должен составлять более 30 мг/м^3 . Использование различных углей с индивидуальных рабочими характеристиками, обусловленными высоким содержанием золы, приводит к необходимости совершенствования методик оценки эффективности золоулавливания частиц, учитывающих конкретные свойства продуктов сгорания и конструкции газоочистного оборудования (батарейных циклонов, электрофильтров, скрубберов). На основе выполненных расчетов эффективности золоулавливания перспективных к использованию на электростанциях России (Виноградовского, Хакасского и Черногорского) месторождений углей, можно сделать вывод, что с увеличением диаметра частиц параметр золоулавливания увеличивается экспоненциально. Снижение параметра обуславливается неравномерностью распределения фракционного состава золы и размера частиц. Из обобщения данных видно, что при увеличении диаметра частиц с 1,5 до 20 мкм параметр золоулавливания растет от 1 до 3,75, что в абсолютных величинах задержки частиц составляет 63,2 и 97,6 %. Минимальная эффективность удаления твердой фазы характеризуется сжиганием Хакасского угля. Для Виноградовских углей параметр золоулавливания частиц в продуктах сгорания не превышает 4,2 (98,5 %) [1].

Разработка мероприятий по совершенствованию работы газоочистных агрегатов для ТЭЦ, использующих высокозольное топливо, позволит повысить эффективность отечественной угольной энергетики.

Литература

1. Бетуганова Е.А., Иваницкий М.С. Исследование закономерностей осаждения частиц при электрофильтрации // Сборник материалов Межрегиональной научно-практической конференции «Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий». г. Волжский 17 декабря 2015 г. С. 123—125.

Я.А. Бирюков (ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, Москва),
А.А. Каверин (НИУ «МЭИ»), аспиранты;
рук. Н.А. Зройчиков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЫСОКОВЛАЖНОГО БУРОГО УГЛЯ

Совершенствование сушки высоковлажных бурых углей в газозаборной шахте позволяет улучшить процесс размола в мельнице-вентиляторе [1] и повысить устойчивость воспламенения топлива. Высушиваемый горячим потоком сушильного агента уголь находится сушильной шахте примерно 1,2-1,6 секунды. Для исследования возможности увеличения времени пребывания частиц угля в шахте с помощью программного комплекса ANSYS Fluent рассчитывался процесс сушки угля при существующей на Кумертауской ТЭЦ конструкции газозаборной шахты и при установке внутри шахты устройств торможения угля (рис. 1). Устройство торможения угля представляет собой усеченный полый конус, который устанавливается в поперечном сечении шахты и перекрывает около 60 % «живого» сечения устройства нисходящей сушки.

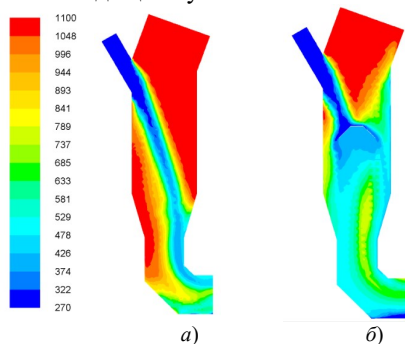


Рис. 1. Поле температур на оси сушильной шахты, К: *a* — исходный вариант; *б* — вариант с устройством торможения угля

По результатам расчетов получена оптимальная конструкция устройства торможения. Снижение влажности угля на выходе из шахты по результатам расчета составило 7,5% по отношению к исходному варианту.

Литература

1. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы) / под общ. ред. Н.В. Соколова и М.Л. Кисельгофа. Л.: НПО ЦКТИ; ВТИ, 1971.

А.Е. Волков, М.М. Соловьёв, студенты;
рук. Б.Л. Шельгин, к.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА «П-102» ДЛЯ АНАЛИЗА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЕКТНЫМ УСЛОВИЯМ

Анализ выполнялся с помощью доступной для студентов ИГЭУ программы расчета котлоагрегатов «ТРАКТ», представляющей полученные результаты в старых единицах измерения теплотехнических параметров.

На основании предварительно установленной зависимости КПД газовой турбины ГТЭ-6П $\eta_{ГТУ}$ от значений ее электрической мощности, лежащей в интервале $N_э = 5 \div 6$ МВт, паропроизводительность котла «П-102» составила $D_{п} = 15 \div 50$ т/ч при температуре наружного воздуха $t_n = 15$ °С получена топливная характеристика энергоустановки. В качестве топлива, поступающего в камеру сгорания ГТЭ-6П, принят природный газ с теплотой сгорания 8558 ккал/нм³.

При значениях коэффициента избытка воздуха за ГТУ $\alpha''_{ГТУ} = 3,9 \div 4,5$ и изменения КПД турбины ГТЭ-6П в диапазоне $\eta_{ГТУ} = 0,24 \div 0,25$ расход топлива в камеру сгорания составлял $2008 \div 2398$ нм³/ч. При температурах продуктов сгорания перед котлом-утилизатором $480 \div 515$ °С температура уходящих газов составляла $97 \div 102$ °С. Паропроизводительность агрегата составляла $D_{п} = 14,06 \div 16,58$ т/ч, а температура перегретого пара поддерживалась на уровне $230 \div 235$ °С, что полностью удовлетворяло технологического потребителя тепловой энергии.

В случае изменения электрической мощности ГТЭ-6П в пределах $5 \div 6$ МВт для достижения номинальной паропроизводительности агрегата 50 т/ч расход топлива, дополнительно сжигаемый в его топочной камере, должен находиться в пределах $2585 \div 2399$ нм³/ч. При этом расход уходящих из ГТЭ-6П газов составлял $12,6 \div 13,6$ нм³/с. Доля байпасирования газов, подаваемых в обвод топочной камеры в ее верхнюю часть, составляла $0,36 \div 0,511$.

Для анализа показателей энергоустановки получены зависимости изменения ряда характеристик от определяющих факторов, позволяющие оценить условия ее эксплуатации.

Представленные материалы адекватны данным, полученным другими исследователями, что подтверждает правильность принятых научно-методических решений. Полученные результаты исследования используются в учебно-методических разработках при подготовке бакалавров и магистров по профилю «Тепловые электрические станции».

Н.Е. Гаврилова, студ.; рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ КОТЛА ТГМП-314

Газомазутные котлы ТГМП-314 ст. №№ 4 и 5 ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго» оснащены горелками «Экотоп» и при существующей схеме сжигания значительно превышают технологические нормативы по выбросам оксидов азота [2]. Значительные изменения природоохранного законодательства РФ [1] приведет в ближайшие годы к резкому увеличению экологических платежей за превышение удельных выбросов оксидов азота. На кафедре ТЭС для этих котлов была предложена схема сжигания топлива в прямоточно-вихревом факеле с заменой вихревых горелок на прямоточные.

В работе было проведено математическое моделирование аэродинамики топочной камеры котла ТГМП-314 для предложенной схемы сжигания топлива с применением программного пакета SolidWorks и современного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent.

В результате моделирования были получены поля скоростей для всего объема топочной камеры. Полученные результаты подтвердили улучшение общей аэродинамики топочной камеры за счет появления множества вихрей во всем объеме топки, как в горизонтальных, так и в вертикальных плоскостях.

Важное достоинство этой схемы связано с тем, что при ее организации предлагается использовать уже существующую разводку труб, что делает ее довольно малозатратной. Предлагаемая схема оптимизирует аэродинамику топочного объема и организует ступенчатое сжигание топлива за счет малой доли первичного воздуха и последующего подмешивания вторичного и третичного воздуха. Это приводит к выравниванию температур по всему объему топки и снижению максимальной температуры факела, что позволяет обеспечить низкую генерацию термических NO_x и эффективное сжигание топлива. Отсутствие высоких локальных значений тепловых потоков должно обеспечить защиту заднего и фронтного экранов от прямого воздействия на них факелов. Тепловые потоки распределяются по всем топочным экранам равномерно, что способствует уменьшению вероятности появления высокотемпературной коррозии топочных экранов.

Литература

1. **Федеральный** закон от 21.07.2014 N 219-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. **ГОСТ Р 50831-95.** Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996. 24 с.

*Ш.Э.О. Гумбатов, студ.; рук. М.С. Иваницкий, к.т.н.
(филиал МЭИ в г. Волжском)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ И БИОМАССЫ

Развитие отечественной теплоэнергетики происходит в соответствии с приоритетными направлениями совершенствования технологий производства тепловой и электрической энергии. Эффективное применение топлива обуславливает его экономичное сжигание и экологическую безопасность при работе котельного оборудования тепловых электростанций.

Повышение доли выработки энергии за счет сжигания угольного топлива предусматривает разработку новых технологий, обеспечивающих максимально полное выгорание топлива и минимизацию вредных выбросов от котлов. Технология сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое является перспективной для отечественной угольной энергетики. Высокие экологические показатели, компактность и реализация низкотемпературного сжигания различных комбинаций топлива обеспечивают возможность широкого использования ЦКС в программах модернизации оборудования электростанций и генерирующих предприятий [1].

На основе проведенных исследований рассмотрены варианты совместного сжигания углей различных месторождений с биомассой (древесные пеллеты). Рассчитаны критериальные соотношения для гидродинамических характеристик двухфазного потока. Определены наиболее рациональные способы обеспечения эффективного выгорания топлива. Разработаны рекомендации по совершенствованию работы топочных устройств котлов с ЦКС. Предложены схемные решения по организации подвода известняка в топочную камеру и улучшения процессов связывания диоксида серы. Рассмотрены особенности работы возвратного циклона и его режимные характеристики. На основе численных экспериментов определены наиболее эффективные критерии управления потоком частиц.

Разработка мероприятий по совершенствованию топочного процесса комбинированного сжигания угля и биомассы в котельных установках с ЦКС позволит повысить энергетическую эффективность и экономичность функционирования действующих и вновь строящихся ТЭС России.

Литература

1. **Перспективы** использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.С. Литун и др. // Теплоэнергетика. 2009. № 1. С. 28—36.

*Н.О. Гурyleва, А.А. Лисицын, студенты; рук. С.Л. Чернов, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

ТЕПЛОЙ РАСЧЕТ КОТЛА М-ОБРАЗНОЙ КОМПОНОВКИ С УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПАРА С ИНВЕРТОРНОЙ ТОПКОЙ

Растущая потребность увеличения эффективности использования теплоты сжигания топлива приводит к необходимости увеличения начальных параметров пара [1]. Но существует ряд проблем, главная из них — дорогостоящие материалы. В НИУ «МЭИ» разработан котел, конструкция которого позволяет значительно снизить капитальные затраты. Это достигается путем принятия следующих решений: использование инверторной топочной камеры; выполнение однокорпусного котла; расположение турбины вдоль задней стены топки.

Котел М-образного профиля, прямоточный, однокорпусной, газоплотный, с промперегревом, с уравновешенной тягой. Паропроизводительность котла 2493 т/ч, параметры свежего пара 35 МПа и 710 °С. Размеры топочной камеры в горизонтальном сечении 14640×26840 мм.

В инверторной топочной камере котла горелки и сопла располагаются в верхней трети топки, а выход дымовых газов — в нижней трети. Дымовые газы движутся сверху вниз, далее направляются в наклонные газоходы, в которых расположены пароперегреватели. В газоходах движение газов подъемное, в конвективной шахте — опускное. Перегреватели основного и вторичного пара разделены по газоходам: перегреватели первичного пара установлены в левом газоходе, перегреватели вторичного пара — в правом. Это позволяет снизить высоту установки выходных коллекторов пароперегревателей примерно с 70 м до 20 м. Общая длина паропроводов снижается в 2,5-3 раза. Это значительно снижает металлоемкость и удешевляет конструкцию, так как в общей структуре стоимости энергоблока с УСКП пара на долю паропроводов приходится порядка 20 % за счет того, что применяемые никелеобразующие сплавы примерно на 1,5 порядка дороже обычных аустенитных сталей.

На основе данных конструктивного расчета топочной камеры и поверхностей нагрева были проведены поверочный тепловой и аэродинамический расчеты котла. По результатам расчета КПД котла брутто составил 93,07 %, расчетный расход кузнецкого угля марки Д составил 91,13 кг/с. Аэродинамическое сопротивление котла по тракту высокого давления составило 173,29 мм. вод. ст. и по тракту низкого давления 197,7 мм. вод. ст.

Литература

1. **Marion J.** Advanced ultra-supercritical steam power plants // Proceedings of Workshop on Advanced ultra-supercritical coal-fired power plants. Vienna, Austria, 2012.

РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА ОТ ГАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО ПУНКТА И ВОЗДУХОЗАБОРОВ КОМПРЕССОРОВ

В настоящее время проблема защиты окружающей среды от шумового воздействия является крайне актуальной в связи с интенсивным развитием энергетики России. Вместе с рядом других негативных факторов повышенное шумовое загрязнение является проблемой, с которой сталкивается большое количество энергетических предприятий.

Наиболее распространенными методами снижения шума на пути его распространения являются акустические экраны и различные виды глушителей шума [1]. Среди положительных характеристик экранов можно выделить следующие: простоту монтажа, возможность установки без отключения действующего оборудования, долговечность использования при минимальных затратах в процессе эксплуатации.

В работе рассмотрены конструкции акустических экранов для снижения шума от газорегулирующего пункта (ГРП) и воздухозаборов компрессоров, выбраны их геометрические размеры, по методике [2] определена расчетная эффективность. Такие источники шума находят широкое применение на энергетических объектах и промышленных предприятиях, часто находящихся в близости от жилых массивов, из-за чего вопросы снижения шума от них представляют повышенный интерес.

Акустические экраны состоят из отдельных панелей, установленных в специальные стойки. Внутри панелей находится негорючий, негигроскопичный звукопоглощающий материал. Высота акустического экрана ГРП составляет 5 м, общая длина экрана — около 20 м, масса — около 4 т. Высота акустического экрана воздухозаборов компрессоров составляет около 4 м, длина — 7 м, масса — около 2 т.

Установка акустических экранов около ГРП и воздухозаборов компрессоров позволяет уменьшить шумовое воздействие от рассматриваемых источников шума на требуемое значение с целью обеспечения санитарных норм по фактору шума в окружающем районе.

Литература

1. **Semin S.A., Tupov V.B.** Complex reduction of noise influence from power enterprises with small heating capacity upon surrounding residential area // Proceedings of Twenty-second International Congress on Sound and Vibration. Florence, Italy, July 12-16 2015. Vol. 1051. P. 8.
2. **ГОСТ 31295.2–2005** (ИСО 9613-2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. М.: Стандартинформ, 2006.

А.А. Каверин, асп.; рук. Н.А. Зройчиков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СХЕМА СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА СО ВСТРЕЧНО-СМЕЩЕННЫМИ ВИХРЯМИ

Сжигание твердого топлива на действующих ТЭС нередко сопровождается проблемами с воспламенением и эффективным горением углей, повышенными выбросами NO_x , шлакованием поверхностей нагрева котла. Наиболее остро указанные проблемы возникают при сжигании низкосортных и низкорекреационных топлив, топлив угрубленного помола.

В предлагаемой схеме сжигания (рис. 1) используются следующие принципы и технологии: установка прямоточных горелок и сопел и их встречно-смещенное расположение; трехступенчатое сжигание топлива; добавление сопел нижнего дутья на стенах шлакового комода. Для разделения потока аэросмеси на два (сильно- и слабозапыленный) и обеспечения ступенчатого сжигания применяется пылеконцентратор [1].

Результаты численного моделирования данной схемы для экибастузского угля показывают, что потери с мехнедожогом составляют $q_4 = 0,5\%$ при $R_{90} = 15\%$, угрубление помола до $R_{90} = 50\%$ увеличивает данные потери до $q_4 = 4,6\%$.

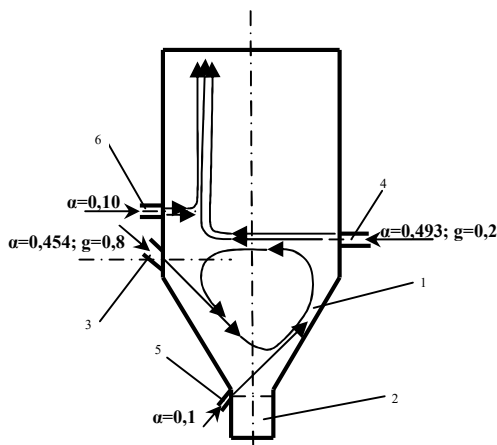


Рис. 1. Сечение топki со встречно-смещенными вихрями по оси горелки: 1 — холодная воронка; 2 — шлаковый комод; 3 — пылеугольная горелка первого яруса; 4 — пылеугольная горелка второго яруса; 5 — сопло нижнего дутья; 6 — сопло третичного дутья

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Системы топливоподдачи и пылеприготовления ТЭС: Справочное пособие / Ю.Г. Назмеев, Г.Р. Мингалеева. М.: Издательский дом МЭИ, 2005.

А.А. Каверин, асп.; М.Д. Забавникова, студ.;
рук. Н.А. Зройчиков д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ТОНИНЫ ПОМОЛА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ КОТЛА П-57

Сжигание топлива угрубленного помола является одним из способов повышения экономичности и надежности работы котельного оборудования отечественных ТЭС, отличающегося повышенным износом. В случае специально организованного процесса сжигания (топочная аэродинамика, конструкция и компоновка горелок), обеспечивающего приемлемые потери с мехнедожогом q_4 при сжигании грубой пыли увеличивается КПД нетто котла, увеличивается срок службы и уменьшаются затраты на ремонт пылеприготовительного оборудования [1].

Объектом исследования являлся котел П-57 Троицкой ГРЭС, предназначенный для работы на экибастузском угле в блоке с турбиной мощностью 500 МВт. Котел прямоточный, на сверхкритические параметры, с промперегревом, однокорпусный, Т-образной компоновки, с уравновешенной тягой и с сухим шлакоудалением [2]. На котельной установке Троицкой ГРЭС применена система пылеприготовления с 8 молотковыми мельницами типа ММТ.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния тонины помола на тепловую схему котла. С помощью программы Boiler Designer построена математическая модель котла П-57, которая верифицировалась сравнением результатов теплового расчета с результатами измерений параметров котла П-57 на Троицкой ГРЭС.

По полученным настройкам были проведены серии расчетов для значений R_{90} равных 15, 30, 40, 50 %. Выявлена минимальная допустимая нагрузка, которую может взять котел при расчетных значениях R_{90} , величина необходимых впрысков, температура металла поверхностей нагрева, КПД брутто котла.

Литература

1. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д.М. Хзмаляна. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. М.: Энергия, 1976
2. Котлы паровые большой мощности: Кат. / ОАО ВНИИАМ; ОАО НПО ЦКТИ. М., 2009. 116 с.

*Линь Цзяньвэй, студ. (СКЭЭУ, Пекин); рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

СНИЖЕНИЕ ШУМА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЭС КИТАЯ

В настоящее время уделяется большее внимание защите окружающей среды от неблагоприятных воздействий. Шум — это одно из неблагоприятных воздействий от работы промышленных предприятий, в том числе от объектов энергетики.

В настоящее время широкое распространение в энергетике получают газотурбинные установки (ГТУ). Газотурбинные установки являются самым сильным источником шума среди энергетического оборудования.

Проведен анализ газотурбинных установок большой мощности устанавливаемых в Китае. Показано, что использование на ТЭС Китая газотурбинных установок большой мощности имеет применение, несмотря на широкое использование угля в энергетике.

Выполнен анализ шумовых характеристик используемых ГТУ. Источниками шума ГТУ являются шум, излучаемый от воздухозабора ГТУ, от устья дымовой трубы, от корпуса турбины. Увеличение мощности ГТУ приводит к увеличению излучаемой звуковой энергии [1].

Проведены акустические расчеты от ТЭС с ГТУ большой мощности с помощью программы Predictor. Акустические расчеты показывают превышение санитарных норм в радиусе нескольких километров. Наибольшее превышение имеет место от воздухозабора компрессора ГТУ, наименьшее — от шума, излучаемого от корпуса ГТУ. На уровне звука на расстоянии от ТЭС с ГТУ влияет количество работающих турбин, расположение оборудования по отношению к жилому району, наличие препятствий на пути распространения шума и другие факторы.

Работа ГТУ возможна только с мероприятиями по шумоглушению [2].

Рассмотрены глушители различных конструкций для снижения шума от воздухозаборов и от среза устья дымовых труб, кожуха для снижения шума от шумов корпусов турбин. Разработка новых глушителей является актуальной задачей для широкого внедрения газовых турбин.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Тупов V.B.** The development of complex silencers for large power stations // 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE. 2012. 4. P. 3130—3141.

СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ СБРОСА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА

Шум является не менее вредным фактором физического воздействия энергетических и промышленных предприятий, чем выбросы в атмосферу вредных веществ, таких как оксиды серы и азота. Продолжительное влияние нежелательных звуков отрицательно сказывается на организме человека, затрагивая его центральную нервную систему, в результате чего у работников предприятий и жителей окружающего района появляются раздражительность, повышенная утомляемость и нарушения слуха [1].

В данной работе рассматриваются меры по снижению шумового воздействия от оборудования крупного промышленного объекта на окружающий район из-за сброса аргона. Сброс аргона является технологически необходимым процессом при эксплуатации металлургического предприятия. Необходимо отметить, что сбросы разных видов газовой среды характерны и для других предприятий, в частности на ТЭС широко распространены сбросы пара в атмосферу. Рассматриваемый источник шума находится на высоте, что увеличивает его негативный эффект и затрудняет применение мероприятий по шумоглушению.

Наиболее эффективным решением данной проблемы является разработка акустического экрана, состоящего из трех панелей, установленных в направляющие швеллеры, которые крепятся к существующим металлоконструкциям. Высота и длина экрана составляет примерно по 3 м, масса – около 700 кг. Предложенная конструкция акустического экрана обладает необходимой акустической эффективностью.

Установка экранов является одним из наиболее распространенных и эффективных методов по уменьшению уровня шума от технологического оборудования на пути его распространения [2]. На рассматриваемом объекте установка разработанного акустического экрана позволяет снизить уровень шума от сброса аргона на требуемое значение с целью достижения санитарных норм по фактору шума в окружающем жилом районе.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

2. **Семин С.А., Тупов В.Б.** Эффективные мероприятия по снижению шума от ТЭЦ и котельной // Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации». Санкт-Петербург, 18–20 марта 2015. С. 268–275.

К.А. Наумова, студ.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ШУМ ОТ ПАРОВЫХ ТУРБИН В ОКРУЖАЮЩЕМ ТЭЦ РАЙОНЕ

Эксплуатация основного энергетического оборудования, к которым относятся паровые турбины, связана с повышенным шумоизлучением. В некоторых случаях это шумоизлучение является источником превышения санитарных норм [1] не только на рабочих местах, но и в окружающем районе.

Рассмотрены факторы, влияющие на шумовые характеристики паровых турбин [2].

Измерения показывают, что при расстоянии между турбинами больше 50 м уровни звука в помещении не зависят от количества одновременно работающих турбин. При уменьшении расстояния между турбинами до 30 м происходит увеличение уровней звука по всей площади турбинного цеха на 4—5 дБА [2].

При увеличении единичной мощности турбогенератора (следовательно, и габаритных размеров) увеличивается уровень излучаемой звуковой энергии. Выполнены акустические расчеты по определению УЗД от различных паровых турбин, как на рабочих местах, так и в окружающем районе.

Для снижения шума, исходящего от паровых турбин, рассмотрено применение кожухов и обработка звукопоглощающим материалом стен турбинного цеха.

Показаны факторы, влияющие на эффективность кожухов. Рассмотрены различные конструкции кожухов для снижения шума от паровых турбин. Проведены расчеты по определению акустической эффективности от применения звукопоглощающей облицовки для стен турбинного цеха. Рассмотрена возможность использования объемных акустических элементов для дополнительного снижения шума внутри котлотурбинного цеха.

Литература

1. **ГОСТ 31295.2—2005** (ИСО 9613-2:1993). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Общий метод расчета. М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 2007.

2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

*А.Е. Ниязбеков, Б.К. Исайнов, студенты;
рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ВЛИЯНИЕ ТОНИНЫ ПОМОЛА УГЛЯ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛОЙ

В процессе эксплуатации котлов поверхности нагрева, находящиеся со стороны продуктов сгорания, покрываются шлаком, золой и сажой. В дальнейшем это приводит не только к ухудшению теплообмена, но и к истиранию поверхностей нагрева летучей золой. У некоторых видов угля зола обладает высокой абразивной способностью. Образующиеся дымовые газы при сжигании такого топлива содержат большое количество золowych частиц, которые изнашивают поверхности нагрева, что требует проведения своевременного ремонта, в противном случае может произойти крупная авария [1, 2].

Объектом исследования являлась летучая зола угля разреза «Каражыра» Восточно-Казахстанской области, взятая из бункеров электрофилтра котла БКЗ90-39. Фракционный состав летучей золы определялся ситовым методом для разной тонины помола угля.

В результате проведенных исследований было определено процентное содержание фракций золы в зависимости от тонины помола угля и коэффициент вероятности попадания частиц на трубу различных фракций золы. Установлена зависимость коэффициента абразивности от размера золowych частиц и определено процентное распределение абразивного износа по фракциям летучей для Каражыринского угля в зависимости от тонины помола.

На основании проведенных исследований была установлена оптимальная тонина помола угольной пыли до 30÷35 %, что приводит в итоге к уменьшению абразивного износа теплообменных поверхностей котла летучей золой.

Результаты данной работы могут быть использованы при оптимизации условий эксплуатации котельного оборудования.

Литература

1. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки: учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1986. 559 с.
2. **Золовый** износ поверхностей нагрева котлов: пароперегревателей, змеевиков экономайзера // ЗАО «Плакарт» URL: <http://solutions.plackart.com/details/50/> (дата обращения: 15.03.2016).

ПРОВЕДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВОЗДУХОЗАБОРОВ ГТУ

При превышении санитарных норм [1] необходимо применять меры по борьбе с шумом от источника. Для рассматриваемой ГТУ-ТЭЦ таким источником шума являются четыре воздухозабора ГТУ, для снижения шума от которых разработана конструкция одноступенчатого глушителя диссипативного типа [2].

Акустические испытания проводятся с целью подтверждения расчетной акустической эффективности глушителя шума после завершения процесса его монтажа в воздухозаборе ГТУ. Разработанный глушитель шума образован пятью пластинами, заполненными звукопоглощающим материалом, обладает умеренным аэродинамическим сопротивлением, а его установка не приводит к снижению производительности ГТУ. Согласно проведенным расчетам установка пластинчатого глушителя шума позволяет уменьшить шумовое воздействие от ГТУ-ТЭЦ на окружающий жилой район до значений, не превышающих санитарные нормы.

Испытания по определению акустической эффективности глушителя шума проводятся следующим образом. Акустическая эффективность глушителя шума в воздуховоде характеризуется по разности уровней звукового давления в точках контроля шума до и после установленного глушителя шума в воздуховоде одинакового сечения или с введением поправки, если площади сечений воздуховода, в котором проводятся измерения, отличаются. Измерения выполняются анализатором шума при рабочей нагрузке оборудования. За контрольные выбраны точки: перед глушителем и за глушителем. Измерения уровней звукового давления проводятся из специальных штуцеров.

Полученные данные сравниваются с расчетной акустической эффективностью устройства по снижению шума. Анализ результатов позволяет определить, насколько эффективно установленный глушитель шума будет справляться с поставленной задачей, а именно обеспечивать соблюдение санитарных норм по фактору шума в окружающем районе.

Литература

1. **СН 2.2.4/2.1.8.562-96.** Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.
2. **Орлов С.С., Семин С.А.** Снижение шума от ГТУ-ТЭЦ при помощи диссипативных глушителей // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в 3-х т. Москва, 25—26 февраля 2016. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т.3. С. 101.

Л.М. Панов, А.Д. Хвостов, студенты; рук. Б.Л. Шельгин, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА «П-88» ПРИ РАБОТЕ ГТЭ-110 В ПРОЕКТНОМ РЕЖИМЕ

Исследование проводилось с помощью доступного для студентов ИГЭУ программного продукта «ТРАКТ», применяющего старые единицы измерения теплотехнических характеристик.

С использованием предварительно установленной зависимости КПД газовой турбины ГТЭ-110 $\eta_{ГТУ}$ от значений ее электрической мощности $N_э = 88 \div 110$ МВт и температуры наружного воздуха, изменяющейся в пределах, $t_n = -30 \div 30$ °С, получена топливная характеристика энергоблока ПГУ-325. В качестве топлива, поступающего в камеру сгорания (КС) газотурбинной установки, принят природный газ с теплотой сгорания 7959 ккал/м³.

При значениях коэффициента избытка воздуха за ГТУ $\alpha''_{ГТУ} = 2,6 \div 3,2$ и изменением КПД турбины ГТЭ-110 в диапазоне $\eta_{ГТУ} = 0,31 \div 0,36$ расход топлива в ее КС составлял $2400 \div 3290$ нм³/ч.

Температура воздуха за осевым компрессором ГТЭ-110 находилась в пределах $340 \div 360$ °С, а значения доли рециркуляции рабочей среды в газовом подогревателе конденсата изменялись в пределах $0,2 \div 0,25$.

Температура продуктов сгорания перед котлом-утилизатором изменялась от 484 до 521 °С, а температура уходящих газов находилась в пределах $102 \div 108$ °С.

При паропроизводительности контура высокого давления котлоагрегата $130 \div 158$ т/ч температура перегретого пара составляла $420 \div 500$ °С. Применительно к контуру низкого давления при расходе пара $33,7 \div 39,6$ т/ч и температурах газов перед пароперегревателем $237 \div 243$ °С значения его температуры находились в пределах $230 \div 239$ °С.

КПД котлоагрегата (брутто) составлял $\eta_{КУ} = 0,77 \div 0,83$, а КПД утилизации теплоты топлива изменялся в диапазоне $\eta_{утил} = 0,5 \div 0,53$.

Для анализа режимов переменных работ энергоустановки разработаны количественные зависимости ряда характеристик от определяющих факторов.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными, представленными в других литературных источниках.

Материал предназначен для практических, лабораторных занятий при подготовке бакалавров и магистров направления «Теплоэнергетика и теплотехника», а также будет включен в учебно-методические разработки кафедры «Тепловые электрические станции».

*Э.Р. Сайфуллин, С.А. Назарычев, А.О. Малахов аспиранты;
рук. В.М. Ларионов, д.т.н., проф. (КФУ, г. Казань)*

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА В ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В настоящее время существуют проблемы, связанные со сжиганием топлива в тепловых энергетических установках:

1) Проблема эффективного использования органического топлива для выработки тепловой энергии. Состав органического топлива непостоянен во времени. Эти изменения нарушают оптимальные условия процесса горения, что приводит к недожогу топлива или избытку окислителя.

2) Проблема утилизации промышленных отходов и попутного нефтяного газа. Использование нетрадиционных видов топлива для выработки тепловой энергии позволит сократить потребление традиционных видов органического топлива.

3) Экологическая проблема вредных выбросов в атмосферу в результате неоптимального сжигания органического топлива.

Разработан алгоритм оптимизирующих действий, который в отличие от существующих способов контроля процессом горения является менее трудоемким и не требует непрерывного контроля состава топлива. Данный алгоритм позволяет реагировать на регламентированные и случайные изменения состава топлива, оптимизируя процесс горения.

Авторами была разработана математическая модель процесса горения углеводородного топлива переменного состава, разработаны блок-схемы и принцип работы автоматизированной системы управления, обеспечивающей оптимальный режим сжигания топлива переменного состава [1].

Результаты проведенных исследований могут быть применены в тепловых энергетических установках, в частности водогрейных и паровых котлах, а также других энергетических установках использующих традиционные и нетрадиционные виды топлива.

Литература

1. **Saifullin, E.R.** Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Y.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 86. 012006.

*С.А. Спасёнова, студ.; рук. М.С. Иваницкий, к.т.н.
(филиал МЭИ в г. Волжском)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛАХ С ЦКС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭНЕРГБЛОКА

Одним из основных вопросов при рассмотрении перспектив использования твердого топлива, в частности, для энергоблоков нового поколения на основе циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) является экономичное и малоэмиссионное горение топлива.

В ЦКС эффективно сжигаются угли с высоким содержанием породы, большим содержанием золы и влаги, меняющегося качества и трудно зажигаемые топлива. При этом топливо не требует мелкого размола, что исключает необходимость использования угольных мельниц и повышает экологическую безопасность электростанции. Отсутствие отдельных серо- и азотоочистки обеспечивает компактность этих энергоустановок, возможность монтажа в ячейки демонтированных котлов, что делает их привлекательными для реконструкции действующих тепловых электростанций [1].

Котлы с ЦКС, по сравнению с пылеугольными котлами, работают в более тяжелых условиях, имеют повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов для подачи воздуха через газораспределительную решетку в зону горения и создания кипящего слоя [1].

На основе проведенного анализа предложены режимно-технологические мероприятия, обеспечивающие выбор наиболее рациональных режимов горения комбинаций топлива на основе моделирования режимов двухфазного потока и составления критериальных уравнений, описывающих стадии развития кипящего слоя.

Разработка мероприятий по совершенствованию топочного процесса и технико-экономических показателей работы котельных установок с ЦКС, использующих различные виды топлива и их комбинации, позволит повысить энергетическую эффективность процесса генерирования тепловой и электрической энергии на отечественных электростанциях.

Литература

1. **Перспективы** использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.С. Литун и др. // Теплоэнергетика. 2009. № 1. С. 28—36.

С.С. Старкова, асп.; рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВНЕДРЕНИЕ НДТ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

В 2014 году произошли большие изменения природоохранного законодательства РФ [1], которые полностью вступят в действие с 2020 года. Данные изменения предусматривают переход от санитарно-гигиенических нормативов к технологическим. Также будут разработаны Информационно-технические справочники (ИТС) по наилучшим доступным технологиям (НДТ), содержащие технологические показатели, на основе которых будут устанавливаться технологические нормативы. Выход ИТС для энергетической отрасли «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» запланирован на 2017 год.

В настоящее время в РФ действует ГОСТ Р 50831-95, в котором установлены технологические нормативы удельных выбросов для ТЭС. Как видно из табл. 1, технологические нормативы в Западных станах более жесткие, чем РФ. Предполагается, что вновь устанавливаемые технологические нормативы в ИТС будут стремиться к показателям, установленным в Западных странах, что для объектов теплоэнергетики Дальнего Востока будет трудновыполнимо и связано с большими финансовыми затратами.

Таблица 1

Нормативы удельных выбросов [2]

Показатель, мг/нм ³ (при $\alpha = 1,4$)	ГОСТ Р 50831-95	НДТ в ЕС (годовые)
NO _x	125-640	65-175
Твердые частицы	50-250	2-10
SO ₂	700-1400	10-180

В соответствии с проектом Приказа Минприроды России сформирован перечень 300 предприятий, относящихся к объектам I категории и вклад которых в суммарные выбросы составляет не менее чем 60 %. В этот перечень вошли 8 крупных объектов теплоэнергетики Дальнего Востока. Для данных ТЭС требования законодательства будут ужесточены. Также с 2020 года плата за выбросы вредных веществ, превышающих технологические нормативы, будет осуществляться с коэффициентом 100 и для ее снижения потребуется внедрение НДТ на ряде ТЭС.

Литература

1. **Федеральный закон от 21.06.2014 г. № 219-ФЗ** «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. **Dr. Hans-Ulrich Thierbach, Lutz Brandau.** Environmentally-friendly methods of coal firing at the thermal power plants, methods of flue gas cleaning // Труды Международной научно-практической конференции «УгольЭко-2016» М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 188 с. С. 80.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ЭНЕРГОБЛОКА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СУШИЛОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В соответствии с программой развития ЕЭС России до 2020 года доля угля в топливном балансе тепловых электростанций (ТЭС) будет расти и достигнет 24%. Это, в свою очередь, вызывает необходимость всерьез задуматься о повышении эффективности и экологичности работы ТЭС.

Повышение эффективности работы ТЭС можно достичь с помощью подсушки топлива. Уменьшение влажности сжигаемого топлива приводит к повышению его низшей теплоты сгорания и к уменьшению его количества, необходимого для выработки 1 кВт×ч электрической энергии. Вместе с этим происходит также сокращение выбросов загрязняющих веществ с дымовыми газами ТЭС в окружающую среду.

Наиболее эффективно данную задачу можно решить при применении паровых панельных сушилок нового поколения. Использование данного типа оборудования топливного тракта ТЭС ведет к сокращению потерь теплоты в окружающую среду. Однако в случае включения ее в тепловую схему ТЭС с использованием пара из отборов турбины, его расход в голову турбины может возрасти [1].

Паровые панельные сушилки нового поколения отличаются от других сушилок барабанного типа тем, что способны подсушивать практически любой тип твердого топлива без налипания на поверхности нагрева сушилки. После подсушки топлива в сушилке оно остается сыпучим, повышается его размолоспособность, сокращаются потери на собственные нужды при размоле, повышается надежность работы оборудования топливоприготовления и топливоподачи, исключается налипание топлива на поверхности углепроводов и их забивание.

Сушилки данного типа были установлены в 70-х годах прошлого века на Славянской ГРЭС для подсушки антрацитового штыба ухудшенного качества и используются в настоящее время. Опыт их использования показал высокую надежность, эффективность и целесообразность массового внедрения паровых панельных сушилок нового поколения в угольную энергетику России.

Литература

1. **Седлов А.С.** Повышение экологической безопасности ТЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

О.К. Степочкина, студ.; рук. М.С. Иваницкий, к.т.н.
(филиал МЭИ в г. Волжский)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАССООБМЕННЫХ УСТАНОВОК КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЛОВ ТЭС

Сжигание топлива на тепловых электростанциях и в котельных приводит к выбросу в атмосферу продуктов сгорания. Содержащих токсичные оксиды азота NO_x . Источником термических и быстрых оксидов азота является молекулярный азот воздуха. Скорость образования термических оксидов азота зависит, прежде всего, от температурного уровня процесса. Однако температура на выходе из зоны активного горения на уровне $T_{\text{з.а.г.}} < 1800 \text{ К}$ слабо влияет на концентрацию оксидов азота в уходящих газах. Для больших температур интенсивность образования NO_x возрастает. Таким образом, при горении азотсодержащих топлив удельные выбросы складываются из термических, топливных и быстрых оксидов азота [1].

Выполнено исследование влияния температуры в зоне активного горения на режимы работы установок кондиционирования уходящих газов. Установлено на примере сжигания Березовского угля, что при росте температуры на выходе из ЗАГ от 1500 до 1800 К удельные выбросы NO_x возрастают с 0,000155 до 0,017 г/МДж, в результате увеличения температуры от 1800 до 2000 К удельный выход дополнительно повышается в 38,24 раза, что составляет 0,65 г/МДж. Таким образом, отмечено, что в условиях изменения паровой производительности пылеугольного котла нагрузка по NO_x на установку кондиционирования уходящих газов значительно изменяется. Проведенный анализ показывает, что для улучшения условий функционирования газоочистных агрегатов каталитического восстановления требуется жестко соблюдать требования по максимальному количеству поступающих токсичных соединений на катализатор, работу которого дополнительно ухудшают процессы отравления. Высокая стоимость катализатора и необходимость восстановления его объема каждые 2-3 года требуют детального подхода к регулированию мощности выбросов.

Расчеты показывают, что количество восстановленных оксидов азота прямо пропорционально расходу катализатора. Обеспечение поддержания количественного соотношения оксидов азота, поступающего в массообменный аппарат в заданном диапазоне, позволит увеличить срок работы кондиционирующей установки и уменьшить эксплуатационные затраты на природоохранные мероприятия, реализуемые на электростанции.

Литература

1. **Росляков П.В.** Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов / П.В. Росляков. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 336 с.

Н.Ю. Ткачёнок, студ.; рук-ли В.Б. Тупов, д.т.н., проф.;
А.А. Тараторин, к.т.н., инж. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАРОВЫХ СТРУЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Наиболее мощным источником шумового воздействия на окружающую среду является выброс пара в атмосферу, при котором происходит временное превышение уровня звука на 30 - 40 дБА в радиусе нескольких километров [1]. Паровые выбросы происходят при пускоостановочных операциях на котлах и во многих случаях являются обязательными в технологическом процессе. Наибольшему шумовому воздействию при паровых выбросах подвергается население рядом с ТЭЦ и другими энергетическими объектами, находящимися рядом с жилыми районами.

По требованиям СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 санитарно-защитная зона (СЗЗ) ТЭС эквивалентной мощностью 600 МВт и выше при работе на газовом и газомазутном топливе составляет 500 м от границы территории объекта. При сбросе пара в атмосферу для обеспечения санитарных норм на границе СЗЗ необходима установка паровых глушителей [2].

Для установки глушителя с оптимальной эффективностью (отношения падающей на вход звуковой мощности к прошедшей через него звуковой мощности) необходимо знать параметры сбрасываемого рабочего тела и условия сброса, такие как пропускная способность предохранительных клапанов, их число, расположение, а также величину требуемого снижения.

На территории Москвы установлены котлы следующих марок: ТГМ - 96 (21 шт.), ТГМП - 314 (16 шт.), ТП - 87 (13 шт.), ТП - 80 (8 шт.), ТП - 210 и ТП - 170 (по 6 шт.) [3].

Расчет паровых глушителей, с учетом параметров пара на выбросе пара позволит достигнуть необходимого снижения уровня шума на границе СЗЗ.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Издательский дом МЭИ, 2005.
3. [Электронный ресурс]. URL: www.mosenergoinform.ru

А.К. Увалиев, В.А. Захаров, студенты;
рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)

ВЛИЯНИЕ ТОНИНЫ ПОМОЛА УГЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА ВЕЛИЧИНУ МЕХАНИЧЕСКОГО НЕДОЖОГА

Один из способов сжигания угля — сжигание в пылевидном состоянии. Полнота сгорания будет зависеть от ряда величин, в том числе и от потерь механического и химического недожога. На механическую неполноту сгорания большое влияние оказывает тонина помола топлива и коэффициент избытка воздуха [1, 2].

Авторы использовали экспериментальные и теоретические методы по определению влияния тонины помола и коэффициента избытка воздуха на потери тепла от механического недожога [3, 4].

Исследования проводились для угля марки Д. Использовали полный факторный эксперимент для определения зависимости механического недожога q_4 от тонины помола x_1 (от 10 до 60 %) и коэффициента избытка воздуха x_2 (от 1,15 до 1,25). Получили уравнение регрессии:

$$q_4 = 1,9945 - 0,4655x_1 + 0,0345x_2 - 1,5055x_1x_2 . \quad (1)$$

Из уравнения видно, что значение потерь тепла от механического недожога в большей степени зависит от совместного влияния тонины помола и коэффициента избытка воздуха, следует отметить, что при раздельном рассмотрении факторов, тонина помола оказывает большее влияние, чем коэффициент избытка воздуха, и с ее увеличением происходит уменьшение потерь.

В дальнейшем планируется провести сравнительный анализ с другими видами угля, используемыми на ТЭЦ.

Литература

1. **Постановление** Правительства Республики Казахстан от 28 июня 2014 года № 724 «Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года.

2. **Коэффициент** полезного действия котла, работающего на твердом топливе // Котельный завод «Росэнергопром». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kvzr.ru/ratio-boiler-efficiency-solid-fuel.html> (дата обращения: 18.11.2015).

3. **Трембовля В.И. Фигнер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок /В.И. Трембовля, 1991. 416 с.

4. **Губин С.В., Яковлев А.И.** Теория планирования экспериментов в энергетике. Киев: «Миллениум», 2009. 158 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ КУЗНЕЦКОГО УГЛЯ В ПРЯМОТОЧНО-ВИХРЕВОМ ФАКЕЛЕ НА КОТЛАХ БКЗ-210-140 ТЭЦ-4 ПАО «Т ПЛЮС»

На ТЭЦ-4 ПАО «Т Плюс» установлено десять котлов БКЗ-210-140. Данный котел спроектирован для работы на кузнечном угле, торфе с твердым шлакоудалением (ТШУ), а также на мазуте и природном газе. Его минимальная нагрузка при сжигании кузнечного угля составляет 150 т/час (71,5% от номинальной нагрузки). В настоящее время при работе котлов на угле концентрация оксидов азота в уходящих дымовых газах (NO_x) превышает нормативную величину (470 мг/(м³) [1]) примерно в 3 раза. КПД брутто котлов при работе на угле составляет порядка 80 %. При этом для поддержания стабильного горения пылеугольного факела производится его подсветка природным газом или мазутом.

В настоящей работе предлагается использовать технологию сжигания топлива в прямоточно-вихревом факеле (ПВФ) на этих котлах, что позволит снизить выбросы оксидов азота до допустимых норм, обеспечить устойчивое горение факела при сжигании твердого топлива без подсветки, а также снизить потери тепла с механическим недожогом. Кроме того рекомендуется замена существующих топочных экранов на газоплотные, что позволит снизить потери с уходящими газами. Технология сжигания топлива в ПВФ была разработана на кафедре ТЭС и хорошо себя зарекомендовала при проведении реконструкций ряда котлов [2]. Эта технология предполагает использование системы прямоточных горелочных устройств и сопел, которые являются устройствами группового действия. Поэтому при разработке схемы сжигания необходимо проведение детального исследования организации аэродинамики топочного объема. Данные исследования будут выполнены с помощью комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent, в основе которой лежат уравнения Навье—Стокса [3]. ANSYS Fluent позволяет получить детальную информацию о развитии и взаимодействии топливных и воздушных струй в топочном объеме.

Предлагаемые мероприятия по реконструкции котлов БКЗ-210-140 позволят повысить экономические и экологические показатели работы котлов.

Литература

1. **ГОСТ Р 50831—95.** Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996, 24 с.
2. **Архипов А.М., Липов Ю.М., Прохоров В.Б.** Использование прямоточных горелок и сопел в топках котлов: инновационный опыт МЭИ: практическое пособие. М.: Издательство МЭИ, 2013. 240с.: ил.
3. **Chung T.J.** Computational fluid dynamics. Cambridge university press, 2002.

*Хуан Янлинь, студ. (СКЭЭУ, Пекин);
рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

СНИЖЕНИЕ ШУМА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЭС КИТАЯ

Актуальными являются вопросы защиты окружающей среды от неблагоприятных воздействий, в том числе от шумового воздействия. Шум является характерным фактором неблагоприятного воздействия от работы объектов энергетики.

Высокая интенсивность шума, генерируемая во время работы газовой турбины, будет серьезно влиять на работу людей на рабочих местах и в окружающем районе. Газотурбинные установки малой мощности широко используются в Китае. При этом газотурбинные установки являются самым сильным источником шума среди энергетического оборудования.

Проведен анализ шумовых характеристик, используемых малых ГТУ. Источниками шума малых ГТУ являются шум, излучаемый от воздухозабора ГТУ, от устья дымовой трубы, от корпуса турбины [1,2]. При этом ГТУ малой мощностью могут находиться рядом с жилыми районами. В этом случае могут быть превышения санитарных норм. Проведено сравнения санитарных норм по шуму различных стран.

Во всех случаях акустические расчеты показывают превышение санитарных норм на значительном расстоянии от ГТУ. Акустические расчеты от ТЭС с ГТУ малой мощности проведены с помощью программы Predictor. Проанализированы различные факторы, влияющие на превышение санитарных норм: тип турбины, ее электрическая мощность, фирма изготовитель, количество установленных ГТУ, расстояние до объекта, рельеф местности, расположение оборудования и другие факторы.

Для ГТУ необходимы меры по шумоглушению воздухозаборов, газовых трактов и корпусов турбин [3].

Приведены глушители различных конструкций для снижения шума от воздухозаборов и от среза устья дымовых труб, кожуха для снижения шума от шума корпусов турбин. Проведено сравнение различных средств шумоглушения.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Тупов V.B., Semin S.A.** Gas turbines noise// 15th International Congress on Sound and Vibration 2008, ICSV. 2008. 3. P. 2414—2418.
3. **Тупов V.B.** Noise aspects of gas-turbine// Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration. 2003. P. 3991—3998.

Д.С. Ценев студ.; рук. В.И. Кормилицын, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СЖИГАНИЕ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ В ТОПКЕ КОТЛА ТП-14А

В настоящее время и последующие периоды развития экономики основу топливного и сырьевого балансов России будут составлять органические виды топлива, среди которых значительная роль принадлежит бурому углю, как наиболее распространенному виду горючих ископаемых, а угольная промышленность была и остается ведущей отраслью материального производства.

Доказательством тому является то, что отрасль располагает всеми потенциальными возможностями, среди которых следует назвать большие запасы углей, наличие технического потенциала и производственных мощностей.

Однако при выемке, обогащении и транспортировке ископаемых углей в районы потребления образуется значительное количество тонких классов, которые, по самым приближенным подсчетам, составляют 4—6 %. Часть мелкодисперсных углей выдувается и просыпается из вагонов при транспортировке, теряется и интенсивно измельчается при погрузо-разгрузочных работах. Сокращение уровня потерь в виде шламов и мелочи путем прямого сжигания затруднено из-за сложности их транспортировки к месту использования. Вместе с тем, угольная мелочь по качественным характеристикам может использоваться для получения качественного брикетного топлива, но ее переработка затруднена из-за сложности организации брикетного производства и необходимости выполнения большого объема строительного-монтажных работ.

В связи с этим актуальны исследования, направленные на разработку технологии брикетирования и сжигания низкокачественной буроугольной мелочи. В данной работе были установлены рациональные параметры и направленное изменение прочностных, теплотехнических характеристик угольных брикетов для сжигания в топке котельного агрегата. А также сравнение традиционной методики сжигания топлива и беспламенного сжигания по методике М.Б. Равича [1]. Добавление катализатора в область горения привело к тому, что снизились показатели вредных выбросов в окружающую среду [2].

Литература

1. **Равич М.Б.** беспламенное поверхностное горение. М.: Изд-во АН СССР, 1949.
2. **Кормилицын В.И.** Экологические аспекты сжигания топлива в паровых котлах. М.: Издательство МЭИ, 1998.

Ю.В. Чуйко, студ.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ОТ ШУМА ГРАДИРЕН

Градири применяются в системах оборотного водоснабжения для охлаждения большого количества воды для теплообменных аппаратов на таких предприятиях, как тепловые электростанции (в том числе АЭС) и ТЭЦ. Градири широко используются благодаря тому, что для их размещения необходима гораздо меньшая площадь, чем для других типов охладителей. В России получили наибольшее распространение противоточные градири с естественной тягой, а также вентиляторные градири.

Градири являются интенсивными источниками шумового воздействия на окружающий район. В градирях с естественной тягой шум вызывает свободное падение воды. В вентиляторных градирях шум складывается от шума падения воды и шума, излучаемого вентиляторами.

Рассмотрены факторы, влияющие на шумовые характеристики различных типов градирен. Особое внимание уделено конструктивным особенностям градирен.

Проведено сравнение шумовых характеристик градирен разного типа и производительности. В соответствии с [1] выполнены расчеты УЗД от шума градирен ТЭЦ разной мощности. На основе проведенных расчетов выполнена визуализация уровней звука в окружающем районе от шума градирен. Проведено рассмотрение возможных мероприятий по снижению шума от них [2].

Для охлаждения воды рекомендуется использовать малозумные вентиляторы — тихоходные вентиляторы с большим диаметром лопастей. Для снижения шума на путях распространения следует использовать диссипативные глушители. Возможным способом снижения шума от градирен является установка экранов. Дополнительное снижение шума происходит при промышленном озеленении с использованием деревьев и кустарников.

Литература

1. **ГОСТ 31295.2-2005** (ИСО 9613-2:1993). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Общий метод расчета. М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 2007.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Секция 44

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЭС И АЭС

*Председатель секции — к.т.н., доцент О.В. Егошина
Секретарь секции — ассистент В.О. Яровой*

Айе Мин Латт, асп.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХЕЛАМИНА

В настоящее время на тепловых электростанциях широкое применение находят альтернативные водно-химические режимы на основе аминосодержащих реагентов [1]. Такая обработка воды должна тщательно контролироваться, чтобы обеспечить формирование защитной пленки. Именно поэтому одной из важных задач является исследование систем дозирования полиаминов на примере дозирования хеламина.

Данная работа направлена на исследование взаимосвязи между показателями качества теплоносителя и концентрацией хеламина (рис. 1, 2) в статических и динамических условиях, на основании которого выбрана и теоретически обоснована управляемая величина в системе дозирования хеламина.

На рис. 1, 2 показана взаимосвязь между показателями качества теплоносителя и хеламином и высокая сходимость между рН и концентрацией хеламина, что подчеркивают коэффициенты корреляции между рН и хеламином – 0.967; между электропроводностью и хеламином – 0.923. На основании выявленной взаимосвязи было исследовано влияние хеламина на показатели качества теплоносителя в динамических условиях.

Результаты исследования взаимосвязи концентрации хеламина с удельной электропроводностью и рН в статических и динамических условиях показали, что в качестве управляемой величины возможно использовать рН или удельную электропроводность. Однако использование рН более предпочтительно по причине малой динамической ошибки, находящейся в пределах погрешности анализатора, и незначительного времени переходного процесса, составляющем около 7 минут.

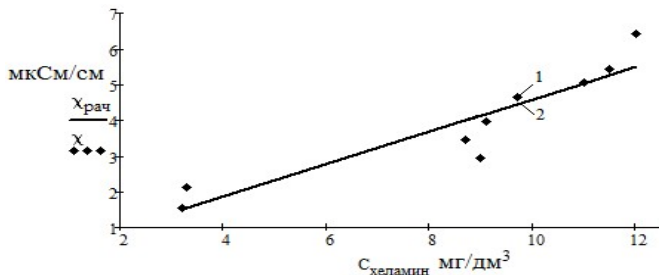


Рис. 1. Зависимость рН от концентрации хеламина в обрабатываемой воде: 1 — экспериментальные значения; 2 — аппроксимирующая модель

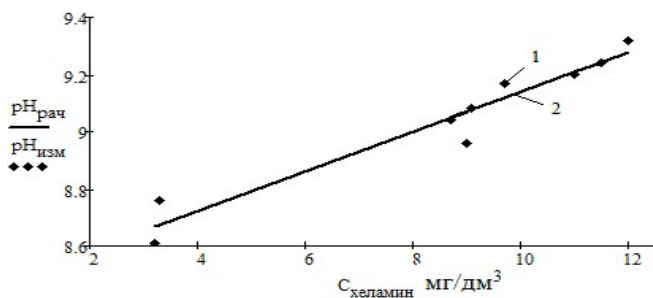


Рис. 2. Зависимость удельной электропроводности от концентрации хеламина в обрабатываемой воде: 1 — экспериментальные значения; 2 — аппроксимирующая модель

Литература

1. Воронов В.Н., Петрова Т.И. Водно-химический режимы ТЭС и АЭС: учебное пособие / под ред. А.П. Пильщикова. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

СОРБЕНТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

В настоящее время проблема очистки воды от нефтепродуктов (НП) является одной из наиболее важных проблем на ТЭС и промышленных предприятиях в разных странах.

Применительно к условиям Мьянмы был поставлен вопрос о возможности использования отходов сельскохозяйственного производства в качестве сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов. В качестве сорбента было выбрано кокосовое волокно из Мьянмы, а в качестве эталона – активированный уголь на основе скорлупы кокосовых орехов марки Aqualat® HyperLine. В эксперименте установлено (рис. 1), что степень очистки на кокосовом волокне составила 88 %, а на кокосовом активированном угле — 83 %. Пики на графиках соответствуют смывам нефтепродуктов с поверхности адсорбента. У активированного угля пики более выражены и больше по величине, чем у кокосового волокна, т.е. поверхность кокосового волокна лучше удерживает пленку нефтепродуктов, чем эталон. После обработки обоих сорбентов водой с температурой 100 °С (рис. 2) количество нефтепродуктов, задержанных с помощью кокосового волокна составило 7,86 мг, а активированного угля — 3,64 мг, что подтверждает ранее полученные результаты. После десорбции была проведена повторная фильтрация воды, загрязненной нефтепродуктами через сорбенты. Установлено, что степень очистки у кокосового волокна и у кокосового активированного угля приблизительно одинаковая и составляет около 90 %.

Результаты экспериментов показывают, что относительно дешевое кокосовое волокно обладает такими же сорбционными свойствами, как и товарный продукт марки Aqualat® HyperLine и может быть успешно применено на ТЭС Мьянмы.

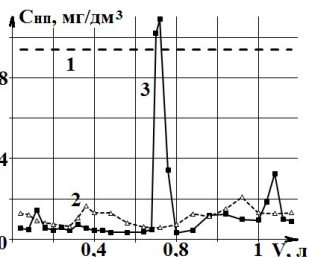


Рис. 1. Изменение концентрации НП в фильтрате: 1 – исходная концентрация НП; 2 – кокосовое волокно; 3 – активированный кокосовый уголь

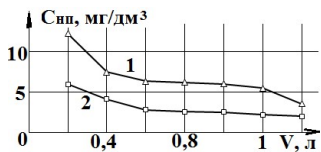


Рис. 2. Изменение концентрации НП в промыточной воде при обработке сорбентов: 1 – кокосовое волокно; 2 – активированный кокосовый уголь

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО КОТЛА НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Дозирование фосфатов в барабан котла является основным средством для снижения скорости образования отложений на теплопередающих поверхностях нагрева котла. В качестве реагента используется Na_3PO_4 . Многими авторами отмечается, что при изменении нагрузки котла концентрации фосфатов по отсекам меняются. Однозначного объяснения этому нет. Ряд авторов связывают это с явлением хайд-аут [1] или с изменением кратности упаривания фосфатов по отсекам [2]. При изменении нагрузки котла концентрации фосфатов по отсекам изменяются. Для выяснения причин, приводящих к данному явлению на ГЭС-1, были проведены опыты по изучению влияния режимных параметров на поведение фосфатов по отсекам при постоянной дозе фосфатов, вводимых в котел.

Кратность упаривания фосфатов в соленом левом отсеке по отношению к чистому отсеку:

$$K_2 = \frac{C_{\text{СО}}}{C_{\text{ЧО}}} = \frac{D_{\text{П2}} + D_{\text{ПР}}}{D_{\text{ПР}}}. \quad (1)$$

Кратность упаривания фосфатов в чистом отсеке по отношению к фосфатам вводимым, если бы они дозировались в питательную воду, запишется в виде:

$$K_1 = \frac{C_{\text{ЧО}}}{C_{\text{ПВ}}} = \frac{D_{\text{ПВ}}}{D_{\text{П2}} + D_{\text{ПР}}}. \quad (2)$$

Таблица 2

Расчетные значения K_2 в зависимости от расхода питательной воды

$D_{\text{ПВ}}, \text{ т/ч}$	143	137	134	128	125	123	120
K_2	9.97	16.10	10.00	8.93	8.52	16.27	9.02

Из представленных данных видно, что концентрации фосфатов по отсекам котла зависят от кратностей упаривания и как следствие этого от точного режима котла.

Литература

1. Верховский А. Е., Морыганова Ю. А., Аунг Мьо Кхин. Изучение поведения фосфатов в барабане котла ТЭЦ МЭИ // Вестник ИЭГУ. Вып. 1. 2016. С. 5—10.
2. Исследование поведения фосфатов при эксплуатации барабанного котла / А.Е. Верховский, К.Г. Гаджиев, В.Е. Кулов и др. // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 1.

ТРИ ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены три аспекта ведения теплотехнических расчетов, в частности, бинарных циклов в современных программных средах с открытым, интерактивным, сетевым форматом. Рассматривается подключение к расчетам баз данных по теплофизическим свойствам рабочих тел, работа с физическими величинами, а не только с единицами их измерения и оперирование «живыми» диаграммами термодинамических циклов. Обсуждается технология масштабирования и сдвига плоских и объемных диаграмм бинарных циклов для количественного графического отображения термодинамических и теплообменных параметров энергоустановок [1].

Для расчета простейшего идеального парогазового цикла в среде Mathcad 15 (рис. 1) были сделаны ссылки на облачные файлы с именами H₂O и Gas и с расширением xmcд (на Mathcad-документы). После таких ссылок в рабочем документе становятся доступными (видимыми, как говорят программисты) порядка 50 функций по теплофизическим свойствам двух рабочих тел: воды/водяного пара и воздуха [2], некоторые из которых будут использованы в расчете. Весь расчет хранится в Интернете по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/PGU.xmcdz>.

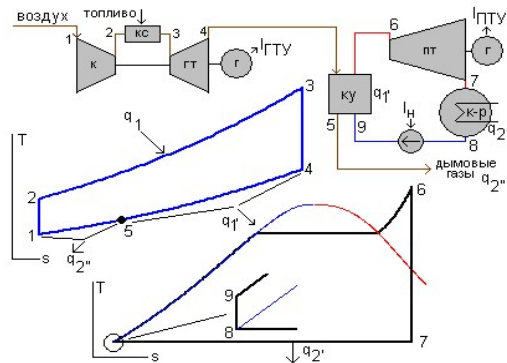


Рис. 1. Облачная база данных по свойствам веществ: ГТУ – газотурбинная установка, ПТУ – паротурбинная установка; ПГУ – парогазовая установка; к – компрессор; кс – камера сгорания; ку – котел-утилизатор

Литература

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов. М.: Издательский Дом МЭИ, 2015. 667 с.
2. Очков В.Ф. «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов // Теплоэнергетика. 2012. № 7. С. 79—86.

Н.А. Большакова, асп.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕЖИМАМИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

В настоящее время на тепловых электростанциях используются различные водные режимы, а именно: с дозированием традиционных реагентов – аммиака в конденсатно-питательный тракт и фосфатов в барабан котла и комплексного реагента – полиамина в питательную воду и барабан котла. С целью поддержания заданного водного режима применяется автоматизированная система химического контроля и управления водным режимом [1].

На сегодняшний день большое внимание уделяется вопросам автоматизации химико-технологических процессов в связи с необходимостью совершенствования водных режимов. Несмотря на применение самых современных средств контроля, эксплуатируемые системы химико-технологического мониторинга используются зачастую в качестве предоставления информации оперативному персоналу, без возможности управления водным режимом с учетом устранения воздействий нарушений химико-технологических процессов в условиях различных режимов работы энергетического оборудования ТЭС.

Необходимыми условиями эффективности функционирования системы управления водным режимом являются достоверный контроль режимных параметров технологического процесса, высокая скорость формирования и решения задач к требуемым моментам времени, способность системы к оперативному поиску решений, адаптация системы к изменяющейся обстановке, учет причинно-следственных взаимосвязей событий [2].

Исследование поведения примесей и корректирующих реагентов, используемых для поддержания водного режима в пароводяном тракте энергоблока, а также изучение влияния температуры анализируемой среды, расхода и качественного состава на динамические свойства автоматических анализаторов химического контроля направлены на совершенствование системы управления водным режимом на тепловых электростанциях.

Литература

1. V.N. Voronov, O.V. Yegoshina, N.A. Bolshakova Effect of water chemistry upsets on the dynamics of corrective reagent dosing systems at power stations // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. P. 903—907.
2. Погребницкий П.П., Воспенников В.В. Использование методов математического моделирования при разработке систем мониторинга тепловых электростанций. // Вестник МАСИ. 2012. № 1.

Д.С. Бунин, А.А. Пруцков, студенты; рук. М.В. Одоевцева, к.т.н., доц.
(филиал МЭИ в г. Волжском)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОТЕЛЬНОЙ

С целью направленного регулирования величины щелочности и соле-содержания питательной воды предлагается модернизация схемы подго-товки воды для паровых котельных промышленных предприятий, путем включения в основную схему установки обратного осмоса [1]. Результаты проделанной работы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества пермеата установки обратного осмоса

Показатели	Вода после II ступени ХВО	$P = 0,3$ МПа	$P = 0,4$ МПа	$P = 0,5$ МПа	$P = 0,7$ МПа
$J\text{C}_o$, мг-экв/дм ³	0,018	0,012	0,01	0,006	0,004
Щ_o , мг-экв/дм ³	2,50	0,08	0,07	0,062	0,052
Cl, мг/дм ³	34,03	3,55	2,84	2,7	2,65
æ, мкс/см	500	6,0	2,6	2,4	2,2
Na, мг/дм ³	32,4	0,409	0,364	0,29	0,22
pH	8,0	5,92	5,86	5,8	5,7

Авторами определена оптимальная величина подмеса химочищенной воды к пермеату для получения добавочной воды с общей щелочностью не более 0,65 мг-экв/дм³. Установлено, что наилучшее соотношение пермеата УОО и умягченной воды после Na-катионитных фильтров - 80% к 20%. В табл. 2 приведены результаты лабораторных испытаний.

Таблица 2

Влияние величины подмеса Na-катионированной воды к пермеату УОО на общую щелочность воды.

I стадия УОО	Na-кат. II ступень	Щ_o , мг-экв/дм ³
10 %	90 %	2,7
20 %	80 %	2,2
50 %	50 %	1,46
80 %	20 %	0,65
90 %	10 %	0,32

Авторами выявлено, что направленное регулирование величины щелочности и соледержания добавочной воды достигается путем регулиро-вания потоков.

Литературы

1. Семёнова Е.В., Одоевцева М.В., Ресурсосберегающие мероприятия в про-цессах водоподготовки технологической котельной // XXI межвузовская научно-практ. конф. молодых ученых и студентов, г. Волжский, 23—25 мая 2015 г. Тезисы докладов. Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2015. 187 с.

Д.С. Бунин, А.А. Пруцков, студенты; рук. М.В. Одоевцева, к.т.н., доц.
(филиал МЭИ в г. Волжском)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПО ПОВЫШЕНИЮ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОЙ

Решение комплексной задачи по модернизации схемы подготовки воды для паровой котельной промышленного предприятия возможно путем модернизации технологического оборудования котельной.

Модернизация котельной предполагает:

- проектирование системы энергоснабжения паровой котельной с применением энергосберегающих технологий;
- включение в схему подготовки воды установки обратного осмоса с целью направленного регулирования щелочности и соледержания умягченной воды;
- целевое применение вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) для повышения эффективности реализации технологического процесса;
- исключение дополнительного расхода питьевой воды на охлаждение продувок котла.

Авторами рассчитано, что направленная корректировка качества воды с использованием мембранной установки снизит соледержание питательной воды котлов с 280 мг/дм^3 до 70 мг/дм^3 , уменьшит величину продувки котла и сократит объем сточных вод в 4 раза. Также рассчитано, что использование периодической и непрерывной продувки парового котла АХ-1750 позволит нагреть исходную (питьевую) воду перед стадией её умягчения до $15\text{—}20^\circ\text{C}$. Внедрение новой схемы исключит дополнительные расходы питьевой воды для охлаждения периодической и непрерывной продувки котла:

зимой с $136,8 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ($49248 \text{ м}^3/\text{год}$) до $34,2 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ($12312 \text{ м}^3/\text{год}$);

летом с $181 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ($65160 \text{ м}^3/\text{год}$) до $45,3 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ($16290 \text{ м}^3/\text{год}$),

и позволит регулировать температуру исходной воды с целью повышения эффективности ее умягчения [1].

Комплексные мероприятия по использованию ВЭР для регулирования температурного режима процесса умягчения воды; сокращения потребления исходной (питьевой) воды на технологические нужды; и внедрение передовой мембранной технологии позволят повысить ресурсо- и энергоэффективность промышленной котельной. Экономия годовых затрат денежных средств на расходные материалы после модернизации котельной составит 943748 рублей. Срок окупаемости предлагаемой модернизации паровой котельной промышленного предприятия 2 года.

Литература

1. Шкроб М.С., Прохоров Ф.Г. Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций. М.: Госэнергоиздат, 1961. С 471.

*М.В. Бутакова, асп.; рук-ли К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
О.В. Гусева, к.т.н., нач. отдела водоподготовки (НПФ Траверс)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВХР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РЕАГЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ АМИНОВ

Поддержание оптимального водно-химического режима (ВХР) теплового оборудования ТЭС, при котором обеспечивается надежная работа всех элементов тепловой схемы котла и паровой турбины, является одной из приоритетных задач текущей эксплуатации.

На тепловых электростанциях с барабанными котлами традиционными видами водно-химических режимов являются гидразинно-аммиачный режим с дозированием аммиака и гидразингидрата в одну или несколько точек конденсатно-питательного тракта, а также фосфатно-щелочной режим для котловых вод. Указанные виды ВХР имеют как свои положительные стороны, так и существенные недостатки, поэтому проблеме оптимизации данных видов ВХР в последнее время уделяется значительное внимание, как в нашей стране, так и за рубежом.

В настоящее время накоплен значительный отечественный и зарубежный опыт ведения ВХР теплоэнергетического оборудования с применением миносодержащих реагентов, обеспечивающий надежную защиту от коррозии внутренних поверхностей оборудования всего теплосилового тракта, как в режиме его эксплуатации, так и в режиме длительного останова.

В данной работе оценивается эффективность внедрения комбинированного ВХР с дозированием сульфата аммония и реагента Аминат ПК-2 на основе нейтрализующих аминов паровых котлов среднего давления ЦЭС АО «БКО». Для этого проведены исследования по определению скорости коррозии установленных индикаторов [1], изучению состава образующейся пленки на индикаторах. Установлено влияние дозирования нейтрализующих аминов на солесодержание насыщенного пара [2]. Также дано экономическое обоснование внедренного комбинированного ВХР [3].

Литература

1. **Акользин П.А.** Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1982
2. **Субботина Н.П.** Водный режим и химический контроль на ТЭС. М., Энергоатомиздат, 1985.
3. **Гриджин А.А.** Экономическая целесообразность применения нового аминного водно-химического режима на примере ТЭЦ ВАЗ. «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи». [Электронный ресурс]. Портал по теплоснабжению РосТепло.ру 2015.

*А.А. Волкова, Ю.В. Лебедева, студенты; рук. Н.А. Еремина, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ODACON ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Наиболее перспективным методом борьбы с атмосферной коррозией, широко применяющимся в различных отраслях промышленности, является применение контактных ингибиторов. Наиболее эффективным ингибитором является пленкообразующий амин — октадециламин (ОДА) — $C_{18}H_{37}NH_2$, защитное действие которого обусловлено формированием на поверхности оборудования устойчивого адсорбционного слоя молекул ОДА, предохраняющего металл от воздействия кислорода, углекислого газа и других коррозионно-агрессивных веществ [1].

Рассмотрен опыт применения ОДА (ODACON) технологии для консервации поверхностей теплоэнергетического оборудования на территории РФ и за рубежом на протяжении последних 15 лет.

ОДА технология показала положительные результаты на многих предприятиях, в том числе: Армянская, Кольская, Балаковская, Нововоронежская АЭС (Россия), АЭС «Пакш» (Венгрия), АЭС «Козлодуй» (Болгария).

По результатам испытаний, проведенных на Владимирской ТЭЦ -1, Ульяновской ТЭЦ -1, Кольской АЭС и ТЭС «Варна» в Болгарии можно сделать вывод, что благодаря технологии снижается количество коррозионных отложений на внутренних поверхностях оборудования, а поверхностью приобретаются гидрофобные свойства.

Применение данной технологии позволяет добиться значительных результатов, а именно:

- 1) надежно защитить от стояночной коррозии основное оборудование, трубопроводы и арматуру;
- 2) улучшить состояние поверхностей нагрева котлов;
- 3) сократить сроки пуска оборудования в работу после остановов;
- 4) значительно снизить количество разрывов поверхностей нагрева котлов;
- 5) осуществлять проведение ремонтных работ даже на законсервированном оборудовании (реагент относится к 4 классу опасности).

Литература

1. Кукушкин А.Н., Омельчук В.В., Вагнер Р. Состояние разработок и промышленное внедрение технологии консервации пароводяного контура блоков АЭС с ВВЭР на основе использования пленкообразующего амина // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 1.

А.А. Дроздов, студ.; рук. Б.М. Ларин, д.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

ПАРОВОДОКИСЛОРОДНАЯ ОБРАБОТКА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Надежная бесперебойная эксплуатация энергетического оборудования в значительной степени зависит от состояния внутренних поверхностей нагрева.

Одним из наиболее эффективных методов обработки поверхностей нагрева котлов является парокислородная или пароводокислородная пассивация и консервация внутренних поверхностей труб.

Метод основан на применении воды, перегретого или насыщенного пара с кислородом для создания на поверхности металла устойчивой защитной пленки, что значительно повышает защиту металла от коррозии на длительный период при остановках, стабильных, переменных и пусковых режимах эксплуатации, существенно сокращает время пуска котлов в эксплуатацию вследствие сокращения периода отмывки [1].

Пароводокислородная обработка кроме того позволяет:

- обеспечить экологическую чистоту за счет отсутствия сточных вод;
- снизить использование химических реагентов;
- снизить металлоемкость и уменьшить трудозатраты на монтаж и демонтаж схемы, что сокращает срок предпусковых работ;
- резко сократить перенос продуктов коррозии в тракте котлов энергоблоков во время их эксплуатации, тем самым обеспечить более надежную продолжительную (не менее 5 лет) работу энергооборудования без дополнительной консервации котлов (энергоблоков) во время их останова;
- обеспечить очистку внутренних поверхностей нагрева;

Данная технология успешно применяется для обработки барабанных котлов, прямоточных котлов, подогревателей высокого давления по паровой стороне и паровых турбин [2].

С участием авторов была проведена парокислородная обработка турбин Т-100/120-130 Усть-Илимской ТЭЦ и К-150-130 ТЭЦ-10 г.Ангарск, а также пароводокислородная очистка, пассивация и консервация барабанного котла БКЗ-420-140 Волгодонской ТЭЦ-2. Результаты проведенной обработки представлены в данной работе.

Литература

1. **СТО ВТИ 37.005 – 2013.** Методические указания по пароводокислородной очистке, пассивации и консервации внутренних поверхностей энергооборудования.
2. **Манькина Н.Н.** Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2008. 432 с.

Ф.В. Дяченко, асп.; рук. Т.И. Петрова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ АМИНОВ НА ТЭС: ОЦЕНКА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

С середины 1980-х годов широкое применение в энергетике находят комплексные реагенты, содержащие пленкообразующие амины (ПОА). Эти реагенты используются для коррекции качества питательной и котловой воды на ТЭС с барабанными котлами, на ТЭС с парогазовыми установками, для предпусковой отмывки оборудования, а также для консервации оборудования во время простоев.

Применение некоторых комплексных реагентов, содержащих ПОА, в РФ регламентировано соответствующими нормативными документами (НД) [1—4]. При этом следует отметить, что данные РД и СТО разработаны для отдельных реагентов или торговых марок без указания типа ПОА и их концентраций, так как последние держатся в секрете компаниями-производителями.

В 2016 г. Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) был утвержден НД по применению ПОА и продуктов на их основе [5]. В основе этого документа заложены конкретные ПОА, применяемые для коррекционной обработки пароводяного тракта ТЭС.

Проведено обследование энергоблока, на котором для коррекции водно-химических режимов используется реагент на основе ПОА – хеламин, а также сравнительный анализ отечественного [1] и международного [5] нормативов по применению ПОА на примере этого энергоблока. Выявлены преимущества и недостатки нормативных документов и предложены пути их совершенствования.

Литература

1. **РД 153-34.1-37.534-2002** Временный регламент по коррекционной обработке хеламином теплоносителя котлов давлением 2,4-13,8 МПа (Хеламинный водно-химический режим).

2. **СО ВТИ 34.37.535-2004** Инструкция по коррекционной обработке комплексным реагентом Epuramin (эпурамин) теплоносителя котлов давлением 2,4-13,8 МПа.

3. **СТО ВТИ 37.003-2009** Методические указания по предпусковой водно-химической отмывке и консервации высоко-молекулярными аминами типа хеламин с диспергатором котлов-утилизаторов и трубопроводов блоков парогазовых и отопительных газотурбинных установок ТЭС.

4. **СТО «Фирма ОРГРЭС» 37-002-2012** Методические указания по коррекционной обработке хеламином теплоносителя котлов давлением 1,4-13,8 МПа (хеламинный водно-химический режим).

5. **IAPWS TGD8-16** «Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants».

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ХИМОЧИЩЕННОЙ ВОДЫ

Одной из многих задач по сокращению потерь с собственными нуждами на ТЭЦ является снижение сброса питьевой воды при химической очистке в блоках подпитки тепловой сети – БПТС.

В БПТС часто процесс регенерации фильтров проводится по количеству кислоты, необходимой для восстановления сработавшей емкости поглощения. Для полной гарантированной регенерации необходимо точное знание сработавшей емкости поглощения, что не всегда возможно. Существует погрешность при измерении количества кислоты используемой при приготовлении регенерационного раствора.

Учет в алгоритме расчета и проведения режима регенерации указанных выше погрешностей практически невозможен в текущих условиях эксплуатации системы. Для повышения точности ведения режима регенерации необходимо применение альтернативных методов.

В существующей автоматизированной системе управления блоками ПТС в режиме регенерации осуществляется автоматический контроль рН и электропроводности регенерирующего раствора после фильтра.

При анализе архивной информации по работе АСУ ТП БПТС за один год было выявлено наличие типового вида изменения показаний рН и электропроводности в процессе регенерации.

Анализ данных зависимостей показал, что момент полного восстановления емкости поглощения фильтрующего материала характеризуется резким изменением химических свойств регенерационного раствора после фильтра. Прекращается поглощение кислоты фильтрующим материалом, и регенерирующий раствор становится кислотным, что должно соответствовать резкому падению рН и возрастанию его электропроводности. Статистический анализ режимов выявил, что время, при котором заканчивается реальная регенерация на 15 % меньше. Применение данного алгоритма позволит оптимизировать режимы регенерации БПТС, что даст существенную экономию кислоты и снизит расход питьевой воды на собственные нужды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Среди новых угольных технологий большой интерес представляет сжигание угля в виде водоугольного суспензии (ВУС). Этот энергетический ресурс рассматривается как альтернатива жидкому топливу и как способ эффективной транспортировки угольных материалов. Развитие технологии получения ВУС актуально при решении глобальных проблем ресурсосбережения и экологии.

В работе представлены результаты исследования свойств ВУС, полученной при кавитационном режиме различной длительности. Состав ВУС – смесь мелкодисперсного порошка бурого Канско-Ачинского угля (зольность 8%, влажность 20%) и дистиллированной воды, концентрация твердой фазы 50% масс.

Показано, что с увеличением времени кавитационного воздействия наблюдалось увеличение T , pH, электропроводности, уменьшение концентрации растворенного кислорода, плотности, поверхностного натяжения воды. Кавитационная водоподготовка дисперсионной среды ВУС влияет на ее структурно-реологические свойства (уменьшение вязкости, увеличение времени седиментации) [1, 2].

Анализ изображения поверхности угольных частиц (РЭМ), элементный анализ локальных участков (анализатор Bruker Quantax70), результаты ЭМР показали, что при кавитации в ВУС изменяется химический состав поверхности и электронная структура частиц угля за счет поверхностной сегрегации примесей в процессе интенсивного перемешивания и их локализацией вблизи границ схлопывающихся кавитационных пузырьков.

Также изучены теплофизические свойства дисперсной фазы ВУС. Обсуждается изменение процесса ее горения при температурах свыше 500°C при различных режимах получения, включая кавитационный.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00477 мол_а.

Литература

1. **Особенности** влияния эффектов кавитации на физико-химические свойства воды и стоков / В.А. Кулагин и др. // Журнал СФУ. Техника и технол. 2014. Т. 7. № 5.
2. **Особенности** поведения коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды при кавитационном воздействии» / Л.В. Кашкина и др. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 7/2.

*В.А. Захаров, А.Т. Гусейнов, студенты;
рук-ли О.А. Степанова, к.т.н., доц.; М.В. Ермоленко, к.т.н.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ

Вопросы взаимодействия теплоэнергетики и окружающей среды постоянно находятся в центре внимания. Производство тепловой энергии котельными, работающими на твердом топливе (угле) сопровождается вредными выбросами в атмосферу. Поэтому совершенствование процессов сжигания топлива не теряет своей актуальности в настоящее время. Одним из возможных путей улучшения состояния экологической обстановки является сжигание угольных брикетов. Технология производства рассматривалась рядом авторов и по отношению к местным углям [1].

Так как данный вид угля не соответствует требованиям брикетирования без связующих веществ, то была поставлена задача выбрать связующее вещество, доступное для региона и с необходимыми качественными характеристиками. На экспериментальном стенде были проведены необходимые исследования по исследованию качественных характеристик. Для сокращения проведения исследований был использован многофакторный эксперимент [2].

При этом в число изменяемых факторов входили: класс крупности шихты и ее гранулометрический состав; рабочая влажность и температура перед прессованием; давление прессования; количество связующего вещества.

В качестве функций отклика были приняты: прочность на сжатие; прочность на сбрасывание; влагостойкость; термоустойчивость.

В результате были определены оптимальные параметры для проведения процесса брикетирования угля местного топлива с добавлением связующих добавок.

Полученные данные могут быть использованы для организации производства угольных брикетов из местного топлива, а также для разработки новых технологий производства угольных брикетов из смеси топлив.

Литература

1. Дерявко И.И., Перепелкин И.Г., Чупрунов К.В. Предварительное исследование возможности брикетирования угольной мелочи разреза «Каражыра» // Вестник НЯЦ. 2001. № 3. С. 207—211.
2. Губин С.В., Яковлев А.И. Теория планирования экспериментов в энергетике. Киев: «Миллениум», 2009. 158 с.

А.А. Зидиханова, студ.; рук. К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕХОДА С ЦЕТАМИННОГО ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ХЕЛАМИННЫЙ

Ведение водно-химических режимов электростанций предполагает решение проблем снижения надежности и эффективности работы энергетического оборудования, связанных с образованием накипи и отложений на его теплопередающих поверхностях, шлама и коррозии внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов. На современных ТЭС с ПГУ используются различные виды традиционных ВХР: аммиачный, гидразинный, гидразинно-аммиачный, фосфатный и другие.

В качестве альтернативы традиционному водно-химическому режиму в настоящее время предлагаются новые реагенты, представляющие собой смесь нейтрализующих и пленкообразующих аминов с различными добавками. Защитное действие полиаминов основано на формировании адсорбционного слоя на всей поверхности металла, с которой соприкасается среда, содержащая полиамины. Аминосодержащие реагенты типа цетамин [1], хеламин [2, 3], эпурамин представляют собой комплексные соединения для обработки котловой воды, способные решать проблемы водно-химического режима в полном объеме.

В работе произведен анализ существующей научно-технической литературы и нормативно-технической документации.

Анализ, произведенный на основании эксплуатационных данных и технологических условий Уфимской ТЭЦ-2 [4], позволил провести оценку экономического эффекта перехода с цетаминного водно-химического режима на хеламинный. При этом учитывалась экономия добавочной воды, экономия с теплотой продувочной воды и экономия реагента. В результате был получен положительный экономический эффект.

Литература

1. Кирилина А.В. и др. Опыт ведения водно-химического режима с использованием цетамина на Шатурской ГРЭС (или как загубить идею) // Энергетик. 2011. № 6.
2. Петрова Т.И., Фурунжиева А.В. Использование хеламина на тепловых электростанциях с барабанными котлами // Электроснабжение и водоподготовка. 2004. Т. 1. С. 2004.
3. Богачёв А.Ф. Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок // Электрические станции. 2006. № 7. С. 33—36.
4. ИЭ 14.05Л–28 Инструкция по ведению водно-химического режима на блоке ПГУ-60.

А.А. Зидиханова, студ.; рук. К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВЕДЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАГЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ АМИНОВ В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Одной из актуальных проблем в энергетике является проблема разработки и ведения водно-химического режима ТЭС. Альтернативой традиционным ВХР, не решающим проблему защиты от коррозионных процессов в полной мере, являются ВХР на основе комплексных аминокислотных реагентов. Одним из таких реагентов является хеламин [1,2], основными свойствами которого являются способность создавать плотную молекулярную защитную пленку на поверхности металла, которая препятствует контакту агрессивной среды с его поверхностью, способность предотвращать образование отложений и разрушать уже имеющиеся отложения, а также возможность переходить в парообразное состояние без разложения благодаря высокой стабильности реагента к воздействию давления и температуры.

Таким образом, применение хеламин позволяет обеспечить защиту от коррозии не только поверхностей нагрева котла, но и пароперегревателей, проточной части турбины и регенеративных подогревателей и всего конденсатно-питательного тракта в целом, снизить загрязненность поверхностей нагрева, а также заменить и полностью исключить из тепломеханического цикла такие реагенты, как фосфаты и гидразин.

В работе проведен анализ использования водно-химического режима на основе хеламин в котле-утилизаторе ПГУ ТЭС. В период с января 2014 по июль 2016 года произведен контроль основных показателей качества питательной, котловой, добавочной воды, основного конденсата и пара.

Проведенный анализ позволяет произвести оценку использования хеламинного водно-химического режима на ПГУ ТЭС [3]. Выявлены положительные моменты применения данного ВХР.

Литература

1. **Богачёв А.Ф.** Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок // Электрические станции. 2006. № 7. С. 33—36.
2. **Богачёв А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б.** Особенности эксплуатации и повреждаемости котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок. М.: Энергоиздат, 2008.
3. **IAPWS TGD8-16.** IAPWS Technical Guidance Document // Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants. September 2016, Dresden, Germany.

*Б.Қ. Исайнов, А.Т. Сарпеков, студенты;
рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

В Республике Казахстан одной из главных отраслей является угольная промышленность. В текущей топливной генерации уголь составляет основную долю – 74 % от совокупного потребления в тоннах условного топлива. В Казахстане представлены все основные сегменты угольной промышленности. Разрабатываются новые месторождения, и возникает необходимость совершенствования процессов сжигания топлива. Общая потребность в энергетическом угле для тепло- и электрогенераций в Казахстане вырастет к 2030 году до 76 млн. тонн [1, 2].

Использованы экспериментальные и теоретические методы по определению качественных характеристик смеси углей, используемых в качестве энергетического топлива[3].

Проведена сравнительная характеристика для углей Каражыринского, Майкубенского и их смеси в различном соотношении следующих величин:

- низшая теплота сгорания;
- зольность на сухую массу;
- температура начала шлакования;
- температура уходящих газов.

Получены значения коэффициента полезного действия брутто котельного агрегата при сжигании данных видов топлива.

Анализ полученных данных показал целесообразность возможности сжигания смеси углей в энергетических котлах. При выборе оптимального соотношения между применяемыми углями допустимо использование многофакторного эксперимента.

Предложения по дальнейшим исследованиям – провести исследование по возможности сжигания местных непроектных углей в смеси с традиционно используемыми.

Литература

1. **Концепция** развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года. Утверждено постановлением Правительства Республики Казахстан от 28 июня 2014 года № 724.
2. **Ревич Б.А.** К оценке влияния деятельности ТЭЖ на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования. 2010. № 4. С. 87—99.
3. **Теплотехнические** испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля и др. 1991. 416 с.

А.К. Колодяжный, асп.; рук. В.Ф. Очков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ В КОТЛОВЫХ ВОДАХ

Порядок рациональной организации и задачи ведения водно-химического режима энергоблоков парогазовых установок фокусируют особое внимание на поведении соединений, имеющих физико-химические свойства тенденциозно концентрироваться в котловых водах — потенциальном источнике релокации соединений кремния в проточную часть паровой турбины.

Кремниевая кислота — слабый электролит, подверженный молекулярно-ионной волатильности формы соединений (координационное число $n = 1—3$).

Характерно отметить, что в настоящее время показатели качества содержания силикатов в котловых водах барабана котла-утилизатора не лимитируются отраслевым директивным документом «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации»[1].

Дифференциация удельного теплового потока экономайзерного участка и гидродинамика двухфазной среды по трубной системе испарителя естественной конвекцией оказывают непосредственное влияние на кратность циркуляции теплоносителя, что выражается в значительно отличающихся величинах содержания кремнекислоты в барабанах котлов.

Наиболее существенная опытная корреляция значений концентрации окислов кремния различной валентности в барабане высокого давления и площади поверхностей нагрева котла-утилизатора представлена на рис. 1.

Эксплуатационные данные параметров, которые легли в основу критического анализа, были получены как в разрезе одной очереди строительства энергоблоков, так и различных объектов генерации, построенных по типовому проекту.

Литература

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации Минэнерго России. М.: СПО ОРГЭС, 2003.

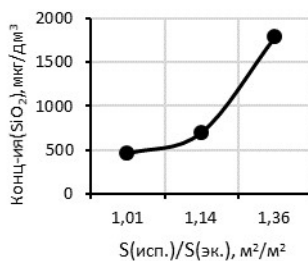


Рис. 1. График зависимости C_{SiO_2} от площади поверхности

СИЛИКОНОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ЖИДКОСТИ

В настоящее время в Российской Федерации все больший интерес вызывают синтетические жидкости для использования в качестве изолирующего и охлаждающего агента в электротехнических изделиях.

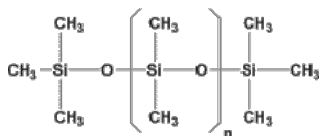


Рис. 1. Структурная формула полидиметилсилоксана

Одной из таких жидкостей является полидиметилсилоксан (ПМС) – линейный полимер диметилсилоксана. Отличительной особенностью подобных полимеров является трудногорючесть, термическая стойкость и не токсичность. Структурная формула ПМС представлена на рис. 1.

В данной работе будут подробно рассмотрены вопросы применения ПМС для производства пожаробезопасных электротехнических изделий, их физико-химические характеристики [1,2] и проведен сравнительный анализ с их ближайшими аналогами [3]: трансформаторным маслом, жидкостью на основе органических и синтетических эфиров (MIDEL).

Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях предусматривает полный отказ от использования полихлорированных бифенилов (ПХБ) в какой-либо форме. Российская Федерация ратифицировала эту конвенцию в 2011 году и на данный момент очень остро стоит вопрос о поиске замены жидкости для производства пожаробезопасных электротехнических жидкостей [4], так как ранее для этих целей использовались ПХБ.

Литература

1. Camino G., Lomakin S. M., Lagueard M. Polydimethylsiloxane Thermal Degradation. Part 2. Mechanism of thermal degradation // Polymer. 2002. Vol. 43. P. 2011—2015.
2. Camino G., Lomakin S. M., Lazzari M. Polydimethylsiloxane thermal degradation Part 1. Kinetic aspects // Polymer. 2001. Vol. 42. № 6. P. 2395—2402.
3. Borsi H. Dielectric behavior of silicone and ester fluids for use in distribution transformers //IEEE transactions on electrical insulation. 1991. Vol. 26. Ni 4. P. 755—762.
4. Addison R. F. PCB replacements in dielectric fluid //Environmental science & technology. 1983. Vol. 17. No 10. P. 486A—494A.

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОСМОТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В процессе изучения принципов работы осмотической электростанции встает вопрос об оптимизации режимов работы станции с целью получения наибольшего количества отпускаемой электрической энергии [1].

Одним из таких вопросов является поиск решения задачи оптимизация величин потоков, поступающих на мембранный модуль, с целью увеличения коэффициента полезного действия станции в целом. При этом встают вопросы определения осмотического давления потока в каждой точке на поверхности мембраны [2], составления модели для расчета величины потока молекул растворителя через поверхность мембраны и т.д.

В данной работе представлена математическая модель процессов перехода молекул растворителя через полупроницаемую мембрану для решения многокритериальной задачи оптимизации процессов на мембранном модуле. Выходными данными является электрическая мощность и коэффициент полезного действия станции, а входными концентрация солей в источниках пресной и соленой воды. Далее для заданного интервала расходов потоков пресной и соленой воды решается задача максимизации КПД электростанции. Графическая интерпретация решения представлена на рис. 1.

Решение подобных задач необходимо не только для проектирования осмотических электростанций, но и для формирования более глубокого понимания процессов, протекающих на мембранном модуле.

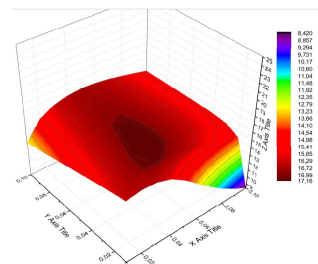


Рис. 1. Графическая интерпретация решения многокритериальной задачи оптимизации

Литература

1. Yip N. Y., Elimelech M. Performance limiting effects in power generation from salinity gradients by pressure retarded osmosis //Environmental science & technology. 2011. Vol. 45. No 23. P. 10273—10282.
2. Cooper J. R., Dooley R. B. Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam / The International Association for the Properties of Water and Steam, 2007.

Д.В. Кузнецова, студ.; рук. К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ В УСТАНОВКАХ PRO

Разработка и эксплуатация устойчивых и экологически безопасных энергетических ресурсов необходима для того, чтобы решить глобальные проблемы дефицита электроэнергии.

В последнее время использование энергии от градиента солености между потоками воды считается перспективной заменой ископаемого топлива [1]. В мембранной системе преобразования осмотического давления с противодавлением (технология PRO) происходит смешение потока пресной воды в сторону с соленым, создавая при этом увеличенный поток с высоким давлением. Далее этот поток с высокой потенциальной энергией может быть полезно использован на турбине для выработки электроэнергии.

Поскольку в качестве источника пресной и соленой воды не всегда имеется возможность использовать моря и реки, возможно применение альтернативных способов получения необходимого ресурса: сточные воды, концентраты обратноосмотических установок и установок дистилляции [1, 2]. Содержание в этих водах органики и других видов загрязнений может значительно ограничить производительность PRO-установок. Поэтому возможность контроля и предотвращения образования отложений являются актуальной проблемой на сегодняшний день. Чтобы обеспечить положительный выход электрической энергии в установках PRO, нужно уменьшить энергозатратность предварительной очистки.

В данной работе были исследованы различные методы борьбы с загрязнениями мембран в установках PRO зависимости от типа схемного решения и содержания примесей [3, 4]. Рассмотрены классические и современные способы очистки соленых и пресных источников [2, 5].

Литература

1. **Recent** advances in osmotic energy generation via pressure-retarded osmosis (PRO): a review / J. Kim et al. // *Energies*.
2. **Kim J., Lee J., Kim J. H.** Overview of pressure-retarded osmosis (PRO) process and hybrid application to sea water reverse osmosis process // *Desalination and Water Treatment*. 2012.
3. **Organic** fouling in pressure retarded osmosis: experiments, mechanisms and implications / Q. She et al. // *Journal of membrane science*. 2013.
4. **Song X., Liu Z., Sun D. D.** Nano gives the answer: breaking the bottleneck of internal concentration polarization with a nanofiber composite forward osmosis membrane for a high water production rate // *Advanced materials*. 2011.
5. **Wan C.F., Chung T.S.** Osmotic power generation by pressure retarded osmosis using seawater brine as the draw solution and wastewater retentate as the feed // *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 479. P. 148—158.

*Ю.В. Лебедева, А.А. Волкова, студенты; рук. Н.А. Ерёмкина, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИАМИНОВ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ТЭС

Одним из путей решения основной задачи водно-химического режима (ВХР) тепловой электростанции (ТЭС) является правильный подбор химических реагентов для коррекционной обработки теплоносителя.

За последние годы «прокатилась» волна по внедрению на ТЭС с барабанными котлами полиаминных ВХР (ПАВР). В настоящее время наиболее распространены три комплексных реагента (КР), на базе которых реализуются ПАВР: хеламин, эпурамин и аквамин.

Можно привести ряд примеров неудачного ведения ПАВР [1]: массовые разрывы экранных труб на котлах двух ТЭС Казахстана, пытавшихся перейти на хеламинный ВХР; массовые разрывы экранных труб в результате их водородного охрупчивания на одном из котлов Кураховской ТЭС, переведенном на эпураминный ВХР; стояночная коррозия пароперегревателя на котле Старобешевской ТЭС, которую, вопреки ожиданиям, не предотвратил эпураминный ВХР.

Эти примеры сами по себе не доказывают, что полиаминные режимы во всех случаях хуже традиционных ВХР. Например, на Ефремовской ТЭЦ с переходом с традиционного на хеламинный водно-химический режим в 2005 году, наблюдалось улучшение качества питательной воды, снижение концентрации железа в ней, уменьшение солесодержания котловой воды. Сочинская ТЭС с 2004 года, так же как и Ефремовская ТЭЦ успешно использует хеламин для ведения ВХР.

Таким образом, есть сведения положительного и отрицательного характера относительно использования ПАВР. На данный момент в литературных источниках и технических отчетах преобладают сведения положительного плана, но тем не менее наиболее распространенным для барабанных котлов высокого давления режимом по сведениям ЦКТИ остается традиционный гидразинно-аммиачно-фосфатный режим, несмотря на присущие этому режиму недостатки [2].

Литература

1. **Суслов С.Ю.** Исследование комплексных реагентов на основе аминов для ведения водно-химического режима и защиты поверхностей нагрева энергетических котлов ТЭС и котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ: дис. ... канд.техн. наук. Иваново, 2013. 156 с.
2. **Ситникова Е.Б.** Влияние пленкообразующих полиаминов на коррекционную обработку пароводяного тракта котельных агрегатов с естественной циркуляцией: дисс. ... канд. техн. наук. Республика Казахстан Алматы, 2010. 137 с.

*Е.А. Макаренко, студ.; рук. М.В. Одоевцева, к.т.н., доц.
(филиал МЭИ в г. Волжском)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ СТОКОВ В СХЕМАХ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ

Разработка комбинированного метода очистки засоленных стоков, включающего предметную подготовку и последующее разделение стоков на вторичный регенерационный раствор для натрий-катионитных фильтров и частично обессоленную воду, возвращаемую в основной производственный цикл промышленных предприятий, является актуальной.

Студентами филиала МЭИ в г. Волжском было установлено, что жесткость засоленных стоков после натрий катионитных фильтров максимально снижается при использовании содоизвесткования, и при ионировании концентрата после установки обратного осмоса (УОО). Достигнутый результат по снижению J_{Ca} в 40—52 раза выше, чем по известным техническим решениям [1—3], т.е. для максимального умягчения засоленных стоков предварительное их концентрирование нецелесообразно.

Эффективность концентрирования умягченных стоков и обессоливания воды оценивались численным методом и на экспериментально-обучающей УОО. Применение комбинированного метода очистки засоленных стоков позволяет сформировать из умягченных стоков Na-катионитных фильтров два целевых продукта: частично умягченную воду (фильтрат) и концентрированный раствор солей натрия который эффективно использовать как основу для регенерационного раствора Na-катионитных фильтров.

Совместное применение ВПУ промышленных предприятий и комбинированного метода очистки засоленных стоков повысит рациональность использования исходной воды и снизит суммарное воздействие ВПУ на окружающую среду.

Литература

1. **Авторское** свидетельство СССР по заявке № 2619081/23-26 кл. С 02 F9/00 23.05.78.
2. **Описание** изобретения к авторскому свидетельству № 85311 от 30.08.81. Бюллетень № 32.
3. **Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф.** Водоподготовка в энергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

К.В. Милина, студ.; рук. Н.А. Большакова, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ В ПАРОВОДОЯНОМ ТРАКТЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ

На данный момент в области энергетики актуальным вопросом остается повышение надежности и эффективности работы энергетического оборудования на тепловых электростанциях. Поддержание параметров водно-химического режима в нормируемых диапазонах обеспечивает безаварийный режим работы энергетического оборудования. В последние годы в России получил распространение водно-химический режим (ВХР) с использованием реагентов на основе пленкообразующих аминов [1]. Применение этих реагентов является альтернативой организации водно-химического режима на ТЭС и АЭС с традиционными методами обработки питательной воды [2].

Одним из типовых видов нарушений водного режима является изменение качества обрабатываемой воды [3]. При использовании пленкообразующих аминов для коррекции водного режима возникает вопрос о влиянии состава продуктов термоллиза пленкообразующих аминов на качество воды и пара и работу автоматических анализаторов химического контроля.

Для поддержания оптимальных параметров качества теплоносителя используют системы химико-технологического мониторинга теплоносителя. На сегодняшний день еще не было изучено влияние пленкообразующих аминов на работу автоматических анализаторов химического контроля в системах химико-технологического мониторинга.

Данная работа предполагает изучение поведения аминоксодержащих корректирующих реагентов в воде и паре, а также изучение примесей, образовавшихся в результате процесса термоллиза этих реагентов и переходе из кипящей воды в насыщенный пар. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования систем управления водно-химическими режимами.

Литература

1. **Богачев А.Ф.** К вопросу влияния органических аминоксодержащих соединений на коррозионные процессы в пароводяном тракте // НРЭ. 2011. № 12.
2. **Петрова Т.И., Петрова Т.И., Фурунжиева А.В.** Использование хеламина на тепловых электростанциях с барабанными котлами // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 1.
3. **Воронов В.Н., Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Проблемы организации водно-химических режимов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2002. № 7.

М.М. Пейливанова, студ.; рук. К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИСКОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Традиционный в отечественной практике промышленной водоподготовки для умягчения и деминерализации с середины 50-х гг. прошлого века метод обработки поверхностных вод, сочетающий коагуляцию (или известкование с коагуляцией) и технологию ионного обмена, успешно вытесняется интегрированными мембранными технологиями (ИМТ) [1], составленные исключительно из мембранных модулей различного назначения: макро, микро, ультра и нанофильтрации, обратного осмоса, мембранной дегазации и электродеионизации.

В то же время опыт промышленной эксплуатации водоподготовительных установок различного типа показывает определяющую роль предварительной очистки (предочистки) воды. Качественная предочистка воды создаёт условия для технико-экономически эффективной обработки воды на последующих ступенях.

В отечественной энергетике дисковые фильтры нашли своё применение в качестве первой ступени фильтрации перед установками ультрафильтрации для защиты ультрафильтрационных мембран от грубодисперсных взвесей в установках ИМТ. Дисковые фильтры удаляют ГДП размером более 5 мкм и используются в качестве грязевиков и фильтров грубой очистки как для частных, так и для производственных нужд [2].

Благодаря особой технологии Spin Klin израильской компании Arkal Filtration Systems дисковые фильтры [3] имеют ряд преимуществ перед другими типами фильтров механической очистки.

В настоящей работе был проведен обзор литературных данных и исследована работа пилотной испытательной установки, выполненной по технологии дисковой фильтрации. Полученные результаты могут быть использованы для выдачи рекомендаций по применению данной технологии.

Литература

1. Пантелеев А.А., Очков В.Ф., Гавриленко С.С. Схемно-технологические решения водоподготовительных установок на базе ИМТ для парогазовых ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 4 (90).

2. Chon K. et al. The role of a combined coagulation and disk filtration process as a pre-treatment to microfiltration and reverse osmosis membranes in a municipal wastewater pilot plant //Chemosphere. 2014. Vol. 117. P. 20—26.

3. **Water Filtration Technology** [Электронный ресурс]: офиц. сайт URL: <http://www.amiad.com/arkal.asp>

М.М. Пейливанова, Д.В. Кузнецова, студенты;
рук. Ю.А. Морыганова, к.х.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО РЕАГЕНТА HELAMIN 906 Н

Использование комплексного реагента хеламин $R[NH(CH_2)_3]_XNH_2$ для коррекции водно-химических режимов на обычных ТЭС с барабанными котлами и ТЭС с парогазовыми установками является актуальным направлением в энергетике [1].

В настоящей работе рассмотрены методики определения комплексного реагента HELAMIN 906 Н, одна из которых была с применением индикатора озин Н $C_{20}H_8Br_4Na_2O_5$ [2].

За основу второго способа количественного определения хеламина взята методика для измерения концентрации октадециламина $C_{18}H_{37}NH_2$, в ходе которой происходит колориметрирование экстрагируемого хлороформом продукта, образующегося при взаимодействии ОДА с метиловым оранжевым [3]. Из-за наличия у октадециламина и хеламина в строении молекул аминогруппы появилось предположение о возможности применения данной методики для хеламина 906Н.

При анализе калибровочных графиков установлено, что обе методики дают сопоставимые результаты опыта. Методику с экстракцией хлороформом возможно применять для определения содержания HELAMIN 906Н при концентрациях больше 1 мг/дм^3 .

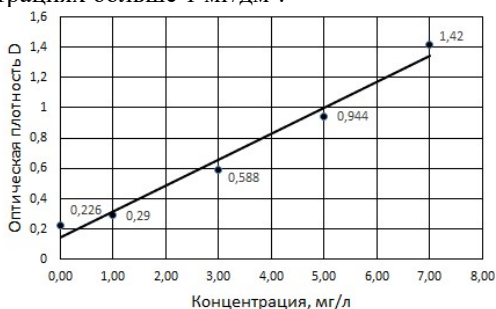


Рис. 1. Калибровочный график для определения концентрации хеламина с использованием хлороформа ($l = 416 \text{ нм}$)

Литература

1. ООО «Хеламин проект» [Электронный ресурс]: офиц. сайт URL: <http://www.helamin.ru>
2. Всероссийский теплотехнический институт [Электронный ресурс]: офиц. сайт URL: <http://vti.ru/public>
3. Меньшикова В. Л., Морыганова Ю. А., Очков В. Ф. Химический анализ в энергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХООБРАЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЕЛАМИНА С ИНДИКАТОРАМИ БЕНГАЛЬСКИЙ РОЗОВЫЙ (БР) И ЭОЗИН Н

В ранее проводившихся исследованиях [1, 2] по определению массовой концентрации хеламина марок 906Н и BRW150 было замечено, что периодически пики светопоглощения приходились на длины волн, соответствующие ультрафиолетовой части спектра, что противоречило значениям длин волн согласно аттестованным методикам, разработанным ОАО «ВТИ». Исходя из сказанного, был сделан вывод о наличии в структуре хеламина других органических соединений, являющихся хромофорами, помимо основного полиаминного компонента. Помимо этого, наблюдались и другие отклонения в измерениях. Поэтому появилась необходимость в проверке методик на чувствительность к таким элементам, входящим в состав хеламина, как моноэтаноламин и циклогексиламин, и необходимость в оценке влияния на значение концентрации хеламина наличия в анализируемой пробе аммиака и железа, которые тоже можно отнести к разряду помехообразующих веществ. Данный вопрос является весьма актуальным на сегодняшний день, поскольку от правильности полученных результатов зависит качество теплоносителя и надежность работы энергетического оборудования в целом.

Из материалов ранее проводившихся работ по данной теме [3] были получены зависимости оптической плотности от концентрации помехообразующих веществ в анализируемой пробе и приведены предельные значения их концентраций, при которых они вносят существенный вклад в результаты измерений.

В настоящей работе выполнена оценка погрешности, вносимой моноэтаноламином и циклогексиламином, а также аммиаком и железом в показания конкретной концентрации хеламина, определяемой с применением индикаторов эозин Н и БР.

Литература

1. Егошина О.В., Яровой В.О., Сазанова М.М. Исследование методик определения концентрации полиаминов в производственных водах ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 10.

2. Сазанова М.М., Кузина К.Е., Егошина О.В. Сравнительный анализ методик определения концентрации полиаминов // XXII Межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва, 25—26 февраля 2016 г. М.: Издательский дом МЭИ. С. 135.

3. Сергеев И.А., Сулов С.Ю., Тимофеев Н.В. Аналитические методики определения содержания полиаминов в водах ТЭС // Энергетик. 2014. № 6. С. 48—56.

С.Р. Саитов, асп.; рук. Н.Д. Чичирова, д.х.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ БАРОМЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТЭС

В последние годы требования к экологической безопасности промышленных предприятий становятся все строже (п. 2 ст. 16 ФЗ РФ от 10.01.2002 № 7, ПП от 12.06.2003 № 344, ФЗ РФ от 23.11.2009 № 261, ФЗ РФ от 19.07.2011 № 89, ФЗ РФ № 52, ФЗ РФ от 27.12.2002 № 184), благодаря чему стали актуальными направления исследования, связанные с защитой окружающей среды и рационализацией природопользования.

Одним из перспективных направлений является защита водоисточников от сбросов с водоподготовительных установок (ВПУ) тепловых электрических станций, согласно которому необходимо уменьшать потребление химических реагентов, а также сокращать объем сточных вод. Методы водоподготовки, применяемые сегодня (преимущественно ионный обмен), недостаточно экологичны и слабо автоматизированы.

С точки зрения защиты окружающей среды и повышения комфортности эксплуатации наиболее эффективно подходят баромембранные технологии, так как они осуществляют безреагентный метод обессоливания воды, при этом установки обратного осмоса (УОО) компактны, а главное, высоко автоматизированы.

Но и здесь возникают проблемы. Обратный осмос дает большой объем стоков за счет низкого коэффициента использования исходной воды, что делает данную технологию неэкономичной с точки зрения водопотребления. Большая часть существующих приемов, направленных на повышение эффективности ВПУ с УОО, подразумевает существенные капитальные затраты на свою реализацию [1].

Возникает потребность в разработке решения, позволяющего сократить размеры стоков путем выявления скрытых внутренних резервов самой схемы, без использования существенных капитальных и дополнительных эксплуатационных затрат. Выявить такие резервы возможно, создав математическую модель схемы ВПУ ТЭС [2], а также проанализировав суточный контроль рабочих параметров.

Литература

1. **Чичирова Н.Д.** Моделирование и оптимизация схемы водоподготовки ТЭС с обратноосмотическими модулями // Труды Академэнерго. 2016. № 2. С. 60—72.

2. **Саитов С.Р.** Программа расчета физико-химических процессов в схемах водоподготовки ТЭС с обратноосмотическими модулями // Свид. о рег. пр. ЭВМ № 2016615906 от 02.06.2016.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК ПАВ ПРИ КОНСЕРВАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Коррозионная защита на теплообменных поверхностях на электростанциях является актуальной проблемой. Основные проблемы при проведении консервации заключаются в расходе реагентов и времени проведения консервации. При проведении консервации ПАВ очень важно знать, когда на поверхности консервируемого оборудования сформировалась защитная пленка. Поэтому в работе рассматривается вопрос образования защитной пленки ПАВ, в частности октадециламина, в зависимости от времени консервации и концентрации ОДА. Чтобы решить эту проблему, существуют различные методы консервации.

В лабораторных условиях получены значения коэффициентов, необходимых для расчета времени проведения консервации в зависимости от концентрации консервирующего раствора до образования устойчивой гидрофобной пленки, препятствующей протеканию коррозионных процессов во время простоя оборудования.

На основании [1] в общем виде зависимость концентрации консервирующего раствора можно выразить следующим выражением:

$$G \frac{dC_{\text{ОДА}}^{\text{СТ}}}{d\tau} = \rho_{\text{В}} \beta_{\text{ОДА}}^{\text{ЭФФ}} \cdot (C_{\text{ОДА}}^{\text{ОСК}} - C_{\text{ОДА}}^{\text{СТ}}) \cdot F - \\ - KGC_{\text{ОДА}}^{\text{СТ}} C_1^{\text{СТ}} + K^{\text{ЭФФ}} C_2^{\text{СТ}} G - \chi_{\text{ОДА}} F C_{\text{ОДА}}^{\text{СН}}, \quad (1)$$

где G — водяной объем; $\rho_{\text{В}}$ — плотность воды; $C_{\text{ОДА}}$ — концентрация ОДА; $\chi_{\text{ОДА}}$ — коэффициент сорбции ОДА; F — площадь поверхности консервируемого оборудования.

Литература

1. Воронов В.Н., Верховский А.Е., Готовцев П.М. Оптимизация водно-химических режимов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 48 с.

Е.А. Селиванов, студ.; рук. Т.И. Петрова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СОСТАВ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ УСКП

Одним из способов повышения эффективности работы энергетического оборудования на тепловых электростанциях (ТЭС) является повышение начальных параметров, то есть температуры и давления. Во второй половине двадцатого века был осуществлен перевод оборудования энергоблоков на ТЭС на сверхкритические параметры (СКП): температура 560 °С и давление 23.5 МПа. В настоящее время имеется тенденция перехода к более высоким (ультрасверхкритическим) параметрам (УСКП) – повышение температуры до 700 °С, давления до 30 МПа [1].

Для эксплуатации энергоблоков при таких высоких параметрах требуется использование принципиально новых сталей. Это связано с тем, что стали, применяемые на блоках с СКП, образуют защитную пленку из магнетита только при температурах до 570 °С. В настоящее время единое мнение о том, какие сплавы должны использоваться при УСКП отсутствует, однако в литературе отмечено, что основными компонентами новых сплавов должны стать никель и хром [2].

В работе дан обзор литературных данных, о влиянии давления и температуры на состояние и состав оксидных слоев для аустенитных, ферритных сталей и сплавов на основе никеля в паре [1,3]. Показано, что наиболее устойчивыми к коррозионным разрушениям при температурах пара 670 °С и давлении примерно 28 МПа являются никельсодержащие сплавы типа IN625. По результатам обзора дано сравнение исследуемых конструкционных материалов по таким показателям, как скорость коррозии, состав и толщина оксидных пленок.

Литература

1. **G.Holcomb** High Pressure Steam Oxidation of Alloys for Advanced Ultra-Supercritical Conditions // Oxid. Met. 2014. P. 271—295.
2. **Петрова Т.И., Роголев А.Н., Селиванов Е.А.** Выбор конструкционных материалов и водно-химического режима для тепловых электростанций сверхкритических параметров. Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 7. С. 22—31.
3. **Zhigang Li, Wanqi Huang, and others.** Boiler Feedwater Oxygenated Treatment in Power Plants in China Power Plant // Chemistry, September-October. 2014. P. 294—318.

А.Я. Сорокина, соиск.; рук. А.Б. Ларин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОСФАТОВ В КОТЛОВОЙ ВОДЕ ПО ИЗМЕРЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Одной из важных задач автоматизации химического контроля качества котловой воды барабанных энергетических котлов является определение концентрации и управление дозированием тринатрийфосфата в котловую воду. При отсутствии автоматических анализаторов на фосфаты функция контроля их концентрации возлагается на измерение удельной электропроводности охлажденных проб котловой воды [1], где возможна корреляционная связь концентрации фосфатов $[\text{PO}_4^{3-}]$ и автоматически измеряемой величины удельной электропроводности (χ).

Сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ был проведен промышленный эксперимент на энергоблоке ТЭЦ-26 Мосэнерго ($p_6 = 13,8$ МПа).

Однако представление о возможности использования измерения удельной электропроводности охлажденных проб котловой воды (χ) для количественного определения концентрации фосфатов оказалось ложным. При изменении качества питательной воды или при использовании рабочего раствора тринатрийфосфата с иной дозировкой щелочи изменяется и корреляционная зависимость ($[\text{PO}_4^{3-}] - \chi$) в котловой воде, что обесценивает ранее полученные результаты. Учет названных факторов в составлении функциональной зависимости заставляет обратиться к использованию измерений удельной электропроводности Н-катионированной пробы (χ_{H}) как питательной, так и котловой воды. С этой целью можно воспользоваться преобразованием обобщенной математической модели ионных равновесий изложенной в литературе [1] для случая измерения удельной электропроводности охлажденных Н-катионированных проб питательной ($\chi_{\text{H,пв}}$) и котловой воды солевого отсека ($\chi_{\text{H,co}}$).

Методика расчета концентрации фосфатов обеспечивает устойчивое косвенное измерение параметров контролируемой среды и позволяет использовать ее для разработки автоматизированной системы управления дозировкой фосфатов в котловую воду.

Литература

1. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В. Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС. Иваново. 2014. 332 с.

Е.А. Столярова, студ.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ ДЛЯ ВПУ НА АЭС

Для предварительной подготовки воды на водоподготовительных установках (ВПУ) применяются различные технические решения: известкование с коагуляцией воды в осветлителе, коагуляция воды в осветлителе без известкования («чистая коагуляция»). В последнее время внедряется современный вид предварительной подготовки воды — ультрафильтрация воды (УФ) [1] и применяются совмещенные технологии — коагуляция воды в осветлителе и ультрафильтрация воды. Кроме того, используется «on line» - коагуляция воды с последующей ее ультрафильтрацией без осветлителя.

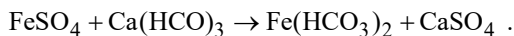
Основной целью любой предварительной подготовки воды является получение воды требуемого качества без его изменения в процессе эксплуатации.

В настоящее время для Курской АЭС-2 проектируется ВПУ.

Традиционные способы предварительной подготовки воды требуют громоздкого, металлоемкого оборудования, плохо поддающегося автоматизации. Кроме того, в работе такого оборудования имеют место сбои в качестве очистки воды.

При УФ исключаются проскоки некоагулированной воды в связи с тем, что процесс фильтрования воды осуществляется через мембрану с заданным рейтингом фильтрации, т.е. вода имеет постоянное качество [1].

В процессе ультрафильтрации воды очистка от взвешенных частиц осуществляется путем впрыска коагулянта непосредственно в трубопровод. Коагуляция воды в этом процессе описывается, например, так:



Коагулированные частицы с водой под давлением поступают в ультрафильтрационную мембрану и задерживаются при фильтровании.

В данной работе рассмотрены две схемы предварительной очистки: осветлитель + ультрафильтрация и ультрафильтрация без осветлителя. Экспериментальные исследования показали, что исключение осветлителя из схемы предварительной очистки воды не влияет на качество осветления воды. Таким образом, качество осветления воды после УФ будет постоянным в течение всего фильтроцикла, будет отвечать повышенным требованиям к качеству добавочной воды при меньшем составе оборудования.

Литература

1. **Рябчиков Б.Е.** Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт, 2004. 328 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Системы химико-технологического мониторинга (СХТМ) позволяют при сравнительно небольших финансовых затратах добиться значительно снижения аварийных остановов энергоблоков тепловых электрических станций (ТЭС) [1]. Дальнейшее развитие этих систем направлено на совершенствование пробоподготовки, приборного парка и повышение возможностей программного обеспечения СХТМ. Последняя задача на сегодняшний день включает в себя следующие элементы:

- поиск причин возникших нарушений водных режимов;
- прогнозирование поведения примесей;
- расчет неизмеряемых показателей водных режимов;
- определение дополнительных индексов, помогающих оператору в контроле за водным режимом.

Внедрение алгоритмов поиска причин нарушений водных режимов позволит минимизировать время выявления причины нарушений и даст возможность персоналу своевременно принять меры по его устранению. Время выявления причины нарушения равно времени работ алгоритма и не превышает нескольких минут.

Основная задача при разработке алгоритмов поисков причин нарушения установление входных параметров. К ним могут относиться следующие показатели, являющиеся результатами:

- измерений автоматического химического и теплотехнического контроля;
- вычислений с использованием математических моделей и методов косвенного измерения на базе данных автоматического химического и теплотехнического контроля;
- измерений лабораторного контроля, в том числе производимых по сообщениям о необходимости выполнения лабораторного анализа для продолжения работы алгоритма;
- вычислений с помощью математических моделей методов косвенного измерения, использующих данные лабораторного химического контроля.

Литература

1. **Готовцев П.М.** Совершенствование водно-химических режимов электростанций с использованием технологических алгоритмов и пакета прикладных программ для систем химико-технологического мониторинга // Автореф. дисс.... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2008. 20 с.

*Д.С. Трухин, студ.; рук. А.Б. Ларин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ

Эксплуатация тепловых и атомных электростанций напрямую зависит от качества водного теплоносителя. Внедрение более совершенных систем позволит увеличить срок службы и снизить затраты на эксплуатацию энергетического оборудования, а также улучшить работу ТЭС на критических и сверхкритических параметрах пара.

На основе результатов исследований [1], студентами и магистрантами кафедры под руководством Ларина А.Б. был разработан и смонтирован универсальный стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания» для изучения и проведения исследования процессов, проходящих при обработке воды.

В состав стенда входят: насос исходной (водопроводной) воды, угольный и механический фильтры, мембранный элемент, напорный бак и мембранный клапан, две колонки, заполненные Н-катионитным и ОН-анионитным ионообменными материалами. По ходу движения обрабатываемой воды стенд оснащен задвижками.

Лабораторный стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания воды» сконструирован с использованием оборудования, предоставленного фирмой «НПК Медиана-фильтр» с возможностью изменения схемы очистки воды и работы в следующих режимах:

- обработка воды по методу химического обессоливания;
- обработка воды по методу обратного осмоса;
- обработка воды по методу двухступенчатого обессоливания,.

Установка предназначена для проведения исследований показателей качества воды и разработки методик калибровки рН-метров в сверхчистых средах.

Литература

1. Ларин Б.М., Колегов А.В., Ларин А.Б. Измерения электропроводности и рН в системах мониторинга водного режима ТЭС. Иваново: ИГЭУ, 2014. 332 с.

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСТАНОВКИ КАРТРИДЖНЫХ ФИЛЬТРОВ НА БОУ ДЛЯ УСЛОВИЙ КУРСКОЙ АЭС-2

В настоящее время ведется активное проектирование новых блоков на Курской АЭС-2. На основе этого актуален вопрос обработки воды, а именно проект блочной обессоливающей установки.

Блочная обессоливающая установка (БОУ) [1, 2] предназначена для получения обессоленного конденсата для обеспечения нормируемых показателей качества питательной и продувочной воды. Как правило, обессоливание конденсата осуществляется по схеме Н-ФСД ионирования. Совместное Н и ОН- ионирование в фильтре смешанного действия (ФСД), в отличие от раздельного, позволяет получить фильтрат с более низким соле- и кремнесодержанием, к тому же один фильтр ФСД, заменяет два последовательно включенных Н и ОН фильтра, что позволяет снизить капитальные затраты на строительство. Для улавливания выноса фильтрующего материала на выходе из ФСД устанавливается фильтр-ловушка. Н-фильтр предназначен для задержания крупных частиц и частичного обессоливания. При пусках нагрузка на него увеличивается и может возникнуть необходимость его частого вывода на взрыхление/регенерацию.

Одним из путей решения данной проблемы является установка предфильтра в схеме БОУ, а именно применение 10 мкм картриджного фильтра перед Н-катионитным фильтром. Основное количество взвешенных веществ в конденсате будут задерживаться картриджным фильтром. При этом снизится нагрузка на Н-фильтр, следовательно, увеличится фильтроцикл и сократится расход воды и реагентов на его регенерацию.

На основе анализа эксплуатационных данных Курской АЭС было проведено исследование целесообразности установки картриджного фильтра перед Н-фильтром на БОУ. В результате были получены данные, которые могут быть использованы для определения технико-экономической целесообразности применения картриджного предфильтра для условий Курской АЭС-2.

Литература

1. **Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф.** Водоподготовка в энергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
2. **Лифшиц О.В.** Справочник по водоподготовке котельных установок. М.: Энергия, 1976.

А.И. Хафизова, студ.; рук-ли Л.В. Круглов, ст. преп.;
О.С. Дмитриева, с.н.с. (КГЭУ, г. Казань)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ В СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНОМ КОНТАКТНОМ УСТРОЙСТВЕ

Для повышения эффективности энергосбережения необходимо постоянно модернизировать существующие теплообменные аппараты. Для повышения КПД таких аппаратов были разработаны струйно-барботажные контактные устройства. В процессе улавливания диоксида углерода ступени струйно-барботажных аппаратов комплектуются из контактных устройств единого размера, количество которых задается необходимой производительностью. Для нахождения оптимальной конструкции, позволяющей увеличить производительность протекающих в аппаратах массообменных процессов и их интенсификации, проведен анализ изменения коэффициента массоотдачи при разных параметрах. Приведены итоги исследования влияния параметров струйно-барботажного контактного устройства на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе.

Авторы предлагают конструкцию аппарата, рассмотренную в работе [1], модернизировать с учетом перекрестного размещения перегородок, по которым стекает жидкость, образуя пленку. После исследования данной конструкции мы получили следующую зависимость:

$$\beta_L = \sqrt{\frac{4D}{b}} \cdot (2g(2(h+h_1)+h_2))^{0,25}. \quad (1)$$

После расчетов по формуле (1) при тех же условиях, что и в работе [1], расчет показал, на сколько возрос коэффициент массоотдачи. Для увеличения значения коэффициента массоотдачи необходимо использовать предложенные контактные элементы с минимальной стороной основания и наибольшим уровнем жидкости в сливном стакане.

Благодаря предложенным струйно-плёночным устройствам можно повысить производительность аппаратов и понизить энергетические затраты на проведение теплообменных процессов.

Полученные данные подтверждают необходимость дальнейших исследований по совершенствованию струйно-плёночного контактного устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60081 мол_а_дк.

Литература

1. Дмитриев А.В., Мадышев И.Н. Определение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в струйно-барботажном контактном устройстве / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 76—80.

А.М. Хоменков, студ.; рук-ли И.С. Никитина, к.т.н., доц.;
И.А. Бураков, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТ РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАСЕЛ

На тепловых электростанциях применяется большое количество турбинных, трансформаторных, промышленных масел и смазок.

Технические масла предназначены для уменьшения трения в машинах и механизмах, снижения износа и охлаждения трущихся поверхностей, защиты их от коррозии. В системах регулирования масла используют в качестве рабочей и смазочной жидкости; в электрических аппаратах – в качестве изолирующей и теплоотводящей среды [1].

При приемке и в процессе эксплуатации масел и смазочных материалов необходимо производить контроль их качества в специализируемой лаборатории.

В лаборатории должно производиться определение таких свойств, как плотность, вязкость, температуры вспышки и застывания, содержание воды и механических примесей, кислотность, коксусемость, зольность, содержание водорастворимых кислот и щелочей, противокислительная стабильность, деэмульсирующая способность.

Разработан проект создания лаборатории энергетических масел для кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Выполнена работа по выбору основного и вспомогательного оборудования: мебели, приборов, химической посуды, реактивов [1]. Произведен расчет затрат, связанных с оснащением проектируемой лаборатории.

Таблица 1

Затраты на оснащение лаборатории

Наименование затрат	Сумма затрат, тыс. руб.
Подвод коммуникаций	167,7
Мебель	1052,738
Основное оборудования	1766,038
Оборудование приборов	48,232
Посуда лабораторная	152,926
Реактивы	24,49
Всего	3212,124

Данная лаборатория может быть использована для обучения студентов, повышения квалификации персонала энергетических объектов, исследования в области нефтепродуктов.

Литература

1. Белосельский Б.С. Технология топлива и энергетических масел: учебник для вузов. — 2-е изд. испр. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2005.

*В.А. Чернова, студ.; Ю.Н. Дорошко, нач. ХВО ЗАО «РЭК»;
рук. В.Н. Виноградов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПАРОВЫХ КОТЛОВ ИВАНОВСКИХ ПГУ

На основании анализа водно-химического режима (ВХР) паровых котлов среднего давления Ивановских ПГУ выявлен ряд недостатков в его ведении. Существующие водоподготовительные установки котельной Ивановских ПГУ были созданы в предположении соответствия исходной воды требованиям к качеству питьевой воды. При последующей эксплуатации ВПУ были выявлены:

1) существенное превышение нормативного рекомендованного значения относительного расхода воды непрерывной продувки котлов вследствие большого значения щелочности исходной и химочищенной и, следовательно, добавочной, питательной и котловых вод. Причиной этого явились большая щелочность исходной воды и ее обработка по методу Натрионирования [1].

2) большое содержание в паре свободной угольной кислоты, значительно превышающее нормативно допустимое. Причиной этого нарушения нормы качества пара является большая щелочность питательной воды.

Системы ведения ВХР котлов не обеспечивают нормируемых значений pH_{25} насыщенного и перегретого паров (pH_{25} фактически менее 6,50), что является нарушением требований п. 4.8.20 «ПТЭ электрических станций и сетей РФ» и причиной коррозии конденсатно-питательного тракта. Для получения пара со значением pH_{25} не менее 7,0, требуется увеличение эффективности декарбонизации на стадии докотловой обработки воды.

При выборе и обосновании мероприятий по увеличению общей эффективности декарбонизации и уменьшения щелочности воды системами ведения ВХР котельного отделения Ивановских ПГУ исследованы закономерности и учтена эффективность совместного H/Na_1 -катионирования с использованием слабокислотного и сильнокислотного катионита и Cl/Na_{II} -ионирования, несмотря на бесспорно имеющиеся недостатки указанных технологий ионирования. Рекомендована и частично реализована реконструкция ВПУ на базе фильтров совместного H/Na_1 -катионирования и Cl/Na_{II} -ионирования при их последовательном включении (корпусы «высоких» фильтров ФИПаI-2,0-0,6).

Литература

1. **Вихрев В.Ф., Шкроб М.С.** Водоподготовка. — 2-е изд., перераб. и доп. учебник для вузов / под ред. М.С. Шкроба. М.: Энергия, 1973. 416 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРЯМОЙ И Н-КАТИОНИРОВАННОЙ ПРОБЫ

Водородный показатель (рН) является ключевым параметром при контроле качества питательной воды тепловых электростанций. В настоящее время для измерения рН используется потенциометрический метод, довольно точный, но не лишенный недостатков, связанных с надежностью датчиков и необходимостью частой градуировки.

Альтернативный способ решения проблемы — это использование кондуктометрического метода для измерения рН [1]. Он основан на измерении электропроводности прямой и Н-катионированной пробы и расчете водородного показателя с помощью математической модели, основанной на решении уравнений электропроводности и электронейтральности.

Полученная математическая модель применима для вод тепловых электростанций, в которых основным ионом является ион аммония (при аммиачном или гидразинно-аммиачном водно-химическом режиме).

Работоспособность модели была проверена на экспериментальной установке кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Во время эксперимента в химически очищенную воду дозировался аммиак, были измерены электропроводность прямой и Н-катионированной пробы и рН (потенциометрическим методом). По измеренной удельной электропроводности воды рассчитан водородный показатель. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Погрешность определения рН не превышает 3,2 %.

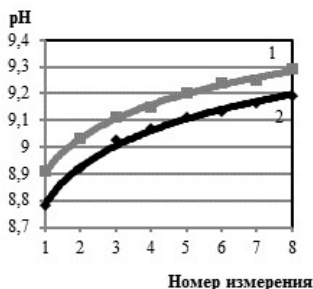


Рис. 1. Измеренное и расчетное значение рН: 1 — измеренное значение; 2 — расчетное значение

Математическая модель также позволяет определить концентрацию аммиака в маломинерализованных водах. Сравнения экспериментальных данных с расчетными показывают, что погрешность расчета концентрации аммиака относительно анализа с реактивом Несслера не превышает 15 %.

Литература

1. Ларин Б.М., Бушуев Е.Н. Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Председатель секции — к.т.н., доцент А.А. Дудолин
Секретарь секции — аспирант Д.А. Ковалёв

К.А. Андрушин, асп.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ МОТОРНОГО РЕЖИМА ПРИ РАБОТЕ ПГУ В КОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

В настоящей статье рассматривается экономическая целесообразность применения моторного режима при работе ПГУ в конденсационном режиме, как альтернативу останову турбины при прохождении ночных провалов нагрузки.

При останове ПГУ с переводом паровой турбины в моторный режим (МР) прибыль станции в период резервирования и последующего пуска оборудования и нагружения ПГУ до номинальной нагрузки складывается из следующих составляющих:

- продажи электроэнергии, выработанной ПГУ в процессе пуска и при работе на номинальной нагрузке;
- затрат на топливо и электроэнергии на пуск ПГУ без паровой турбины;
- затрат на топливо на производство электроэнергии при работе на номинальной нагрузке;
- затрат электроэнергии на обеспечение работы паровой турбины в МР;
- затрат топлива на компенсацию мощности «питающего» блока ($\Delta N_{\text{пит}}$) за счет отбора пара на обеспечение работы паровой турбины в МР.

С учетом перечисленных составляющих прибыль станции составит

$$S_2 = C_3 (\mathcal{E}_{\text{МР}} + N_{\text{ПГУ}} \Delta \tau_{\text{опр-МР}}) - C_T (V_{\text{пэмр}} + b_{\text{ПГУ}} N_{\text{ПГУ}} \Delta \tau_{\text{опр-МР}} + \Delta V_{\text{прмр}} \tau_{\text{пр}} + \Delta N_{\text{пит}} b_{\text{ср}} \tau_{\text{пр}}) - C_3 [\alpha_{\text{снмр}} \mathcal{E}_{\text{МР}} + (N_{\text{ГМР}} + N_{\text{снмр}}) \tau_{\text{пр}}],$$

где $V_{\text{пэмр}}$, $\mathcal{E}_{\text{МР}}$ — расход топлива и выработка электроэнергии при пуске; $N_{\text{ПГУ}}$ — номинальная мощность ПГУ (МВт); $\Delta V_{\text{прмр}}$ — приведенные часовые затраты топлива на остановленном в резерв ПГУ без паровой турбины; $N_{\text{ГМР}}$ — мощность, отбираемая генератором из сети (МВт); $\alpha_{\text{снмр}}$ — средняя доля механизмов собственных нужд; $b_{\text{ср}}$ — средний удельный рас-

ход топлива на выработку электроэнергии «питающего» блока, кг/(кВт·ч);
 $N_{\text{снмр}}$ — мощность механизмов собственных нужд (конденсационного и циркуляционного насосов) (МВт),

$$N_{\text{снмр}} = N_{\text{кн}} + N_{\text{цн}}.$$

Длительность провала, в течение которого применение МР по отношению к останову паровой турбины при резервировании ПГУ выгоднее; она составляет

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пр}} = & C_{\text{э}}(\mathcal{E}_{\text{мр}} + N_{\text{нпгу}} \Delta \tau_{\text{опр-мр}} - \mathcal{E}_{\text{опр}} - \alpha_{\text{снмр}} \mathcal{E}_{\text{мр}} + \alpha_{\text{снопр}}) + \\ & + C_{\text{т}} (b_{\text{нпгу}} N_{\text{нпгу}} \Delta \tau_{\text{опр-мр}} + B_{\text{эопр}} - B_{\text{эмр}}) / C_{\text{э}} (N_{\text{гмр}} + N_{\text{снмр}}) + \\ & + C_{\text{т}} (\alpha_{\text{снмр}} - \alpha_{\text{снопр}} + b_{\text{ср}} N_{\text{пит}}). \end{aligned}$$

Батсамбуу У., асп.; рук. А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПГУ С ВЦГ ДЛЯ УСЛОВИЙ МОНГОЛИИ

С 2007 г. центральная часть Монголии испытывает дефицит электроэнергии, вплотную приблизившись к пиковому потреблению. В среднем за год потребление растет на 5,7 %, и все труднее становится гарантированное электроснабжение потребителей, в том числе и из-за того, что все станции устарели, самая молодая из них ТЭЦ-4 (г. Улан-Батор), построенная еще в 1983 г., уже также достигает этого состояния.

Минэнерго Монголии утвердило план работы на 2015—2030 годы. В плане намечено строительство новых электростанций: ТЭЦ-5, Багануур ТЭЦ, Сайншанд ТЭЦ, Чандаганы ТЭЦ, Сайншанд Ветровой парк и т.д.

В настоящее время актуальным является вопрос обеспечения электроэнергией до момента введения в строй этих энергоисточников. Решить проблему можно либо путем увеличения импорта электроэнергии из РФ, либо путем увеличения мощности действующих электростанций, используя современные экологически безопасные технологии [1].

Основным топливным ресурсом для развития энергетической отрасли Монголии является уголь. Общегеологические запасы угля Монголии оцениваются в количестве 150 млрд. т и из них более 20 млрд. т является подтвержденными производственными запасами [2].

Перенимая мировой опыт, в энергосистему Монголии могут быть внедрены парогазовые технологии, способные повысить эффективность сжигания топлива и добиться высоких показателей работы энергоблоков. В этой связи в работе проводятся исследования и выбор схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией (ВЦГ) угля при реконструкции существующих электростанций с паросиловыми энергоблоками, что позволит повысить экономичность действующих блоков более чем на 5% и снизить выбросы вредных веществ.

Разработанные в ходе выполнения работы методики, алгоритмы и научные исследования позволят использовать их при реконструкции и новом строительстве энергообъектов Монголии с учетом климатических и индивидуальных особенностей топливных месторождений и могут считаться одними из лучших технических решений для поставленных задач в энергетике Монголии.

Литература

1. **Закон об энергетике Монголии.** 01 фев. 2001 года. Монгольское правительство. Улан-Батор, 2001.
2. **Очирбат П.** Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса Монголии. М.: «Мир горной книги», Изд-во МГГУ, Горная книга», 2007. 275 с.

Т.Н. Братченко, асп.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ТУРБОАГРЕГАТОВ Т-100/110-130 В РЕЖИМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЫНКА

Главной задачей улучшения состояния энергетического комплекса РФ в настоящее время является повышение экономичности действующих станций. На данный момент существует огромное количество методов модернизации, направленных на повышение энергетической эффективности оборудования и сокращения топливных затрат.

Одно из решений связано с уменьшением вентиляционного пропуска пара в ЧНД (на теплофикационных агрегатах) и, соответственно, переводом агрегата в режим противодавления.

В данной работе проводится анализ эффективности использования метода модернизации с точки зрения получения максимального маржинального дохода. Перевод турбоагрегата в режим противодавления, позволяет увеличить отпуск пара из отборов данной турбины на величину вентиляционного пропуска, тем самым увеличивает максимальную тепловую нагрузку турбоагрегата. При этом тепловая нагрузка станции остается постоянной, и это приводит к определенным ограничениям, а именно к снижению выработки электрической энергии на тепловом потреблении на других турбинах.

Перевод в режим противодавления приводит к тому, что электрическая мощность турбины определяется тепловой нагрузкой и параметрами графика теплосети. В результате возникают ограничения располагаемой мощности, что приводит к снижению оплаты мощности по месяцам года.

С учетом перечисленных выше факторов, был проведен расчет тепловой схемы [1] и оценена экономическая эффективность перевода. Определяющим показателем эффективности является маржинальный доход.

Из полученных расчетов можно сделать вывод о том, что модернизация эффективна только при несении агрегатом тепловой нагрузке, соответствующей определенной электрической мощности модернизированного турбоагрегата, а именно 75 МВт и более. В ином случае, например при работе в неотапительный период с низкой теплофикационной нагрузкой, перевод турбоагрегата в режим противодавления не принесет экономического эффекта

Литература

1. Печенкин С.П., Серебрянников В.Н., Тишин С.Г. Расчет на ЭВМ тепловых схем паротурбинных установок ТЭС и АЭС / под ред. С.Г. Тишина. М.: Издательство МЭИ, 1992.

*И.А. Васильев, Е.М. Фёдорова, студенты;
рук. Е.Н. Олейникова, к.т.н., ст. преп. («НИУ «МЭИ»)*

ТЕХПЕРЕВООРУЖЕНИЕ СТАНЦИИ С ЭНЕРГОБЛОКАМИ МОЩНОСТЬЮ 450 МВт С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРОГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Одним из перспективных направлений развития современной энергетики является применение на тепловых электрических станциях газотурбинных и парогазовых установок, работающих на природном газе. Переход на парогазовые технологии существенно повышает конкурентоспособность станции на рынке электроэнергии за счет снижения удельного расхода условного топлива, потребления электроэнергии на собственные нужды и снижения выбросов вредных веществ [1].

В работе были исследованы схемы конденсационной паросиловой установки (ПСУ) с турбиной К-450-23,5 и дубль-блочной парогазовой установки утилизационного типа на базе газовых турбин ГТЭ-160 производства ПАО «Силловые машины». Конструкторский расчет схем проведен для температуры наружного воздуха +15°C. Климатические условия – г. Москва. Проведено сравнение показателей тепловой экономичности ПСУ и ПГУ. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что переход от паросиловых технологий на парогазовые приводит к снижению удельного расхода условного топлива и увеличению электрического КПД брутто и нетто.

Таблица 1

Сравнение энергетических показателей энергоблоков

Показатель	Значение	
	ПСУ	ПГУ
Электрическая мощность при номинальной нагрузке, МВт	450	482,6
КПД по производству электроэнергии брутто, %	43,0	51,1
КПД по производству электроэнергии нетто, %	42,3	49,8
Удельный расход условного топлива брутто, г/кВт·ч	286	240,4
Удельный расход условного топлива нетто, г/кВт·ч	291	246,6

Литература

1. **Расчет** экономических показателей тепловых схем и элементов газотурбинных и парогазовых установок электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, С.Н. Дорофеев и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2000.

А.В. Габрух, студ.; рук. В.С. Агабабов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА АБСОРБИЦИОННОГО ТИПА

Технология тригенерации подразумевает выработку электроэнергии, теплоты и холода на едином источнике генерации энергии и снабжение потребителей централизованно не только электроэнергией и теплотой, но и холодом. Такая система может иметь более высокую термодинамическую эффективность по сравнению с когенерацией.

Использование термотрансформатора абсорбционного типа (АБТТ) для генерации холода на энергоблоке с теплофикационной турбиной Т-250-240 позволяет повысить эффективность установки. Для работы

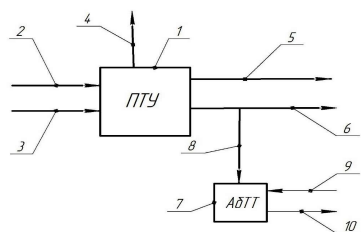


Рис. 1 Структурная схема энергоблока Т-250-240 с термотрансформатором абсорбционного типа: 1 – паротурбинная установка; 2 – линия подвода топлива; 3 – линия подвода воздуха; 4 – уходящие газы от котла ПТУ; 5 – выход электроэнергии из генератора ПТУ; 6 – выход тепловой энергии в виде пара из отборов турбины; 7 – абсорбционный термотрансформатор; 8 – подача пара от линии теплофикационного отбора к АБТТ; 9 – вход хладагента в АБТТ; 10 – выход хладагента из АБТТ

АБТТ необходимо подвести тепло в виде пара, который берется от одного из отборов турбины. При этом снижаются потери теплоты в холодном источнике — конденсаторе, снижается расход циркуляционной воды, поступающей в конденсатор, что уменьшает потери воды из градирни. В неотапительный период увеличивается нагрузка теплофикационных отборов турбины для обеспечения работы АБТТ, который в свою очередь генерирует холод. Увеличение теплофикационной нагрузки турбины повышает ее технико-экономические и термодинамические показатели.

На рис. 1 приведена структурная схема энергоблока Т-250-240 с термотрансформатором абсорбционного типа.

Проведены расчеты термодинамического анализа эксергетическим методом [1].

Литература

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973.

А.А. Гражданов, асп.; рук. А.С. Седлов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ТЭЦ С ТЕПЛОФИКАЦИОННЫМИ ПАРОВЫМИ ТУРБИНАМИ Т-100-130, ВЫРАБОТАВШИМИ СВОЙ РЕСУРС

В настоящее время в структуре генерирующих мощностей России основную роль играет оборудование с традиционным паросиловым циклом. Причем мощности, установленные на ТЭЦ, вырабатывают значительные объемы электроэнергии. Прогнозные оценки на уровне 2017 года показывают, что газомазутные и пеллеугольные мощности ТЭЦ выработают свой ресурс на 58 и 48 % соответственно.

Наиболее распространенными теплофикационными турбинами на ТЭЦ являются турбины типа Т-100-130 и их последующие модификации, большинство из которых устанавливались в 1960—1970-х годах прошлого века и к настоящему времени выработали свой парковый ресурс [1]. С момента пуска в эксплуатацию этих турбин были разработаны новые технические решения, позволяющие существенно повысить как экономичность, так и надежность эксплуатации турбин такого типа.

В работе проводится технический и экономический анализ эффективности различных вариантов модернизации и реконструкции действующих турбин, выработавших свой парковый ресурс и приближающихся к выработке индивидуального ресурса. Модернизация действующих турбоагрегатов приводит к возобновлению ресурса основных высокотемпературных деталей и узлов турбины, «моральному» обновлению турбины с одновременным увеличением мощности и повышением эксплуатационных показателей: надежности, экономичности, маневренности и ремонтпригодности.

Проведен анализ трех путей модернизации с заменой только ЦВД, ЦВД+ЦСД, ЦВД+ЦСД+ЦНД. В результате этих модернизаций восстанавливается парковый ресурс до 220 тыс. ч, увеличивается электрическая мощность на 10—25 МВт и тепловая на 28 Гкал/ч. При этом КПД теплофикационной паротурбинной установки возрастает на 2,5-3,0% при тех же начальных параметрах. В качестве перспективных вариантов замены рассмотрены турбоагрегаты основных российских производителей, таких как ЗАО «УТЗ» и ПАО «Силовые машины».

Литература

1. **Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П.** Тепловые электрические станции. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

Ю.К. Дёмин, студ.; рук. Х.Н. Аловадинова, асп.
(МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В ЛЕТНЕЕ ВРЕМЯ

Особенностью работы паровой турбины с регулируемым теплофикационным отбором в летнее время является переход на конденсационный режим [1], при котором происходит закрытие теплофикационного отбора с увеличением количества пара, проходящего всю ее проточную часть и поступающего в конденсатор. Таким образом, происходит увеличение электрической мощности турбоагрегата за счет увеличения количества срабатываемого пара. Однако в летнее время кроме падения теплофикационной нагрузки происходит и увеличение температуры подаваемой в конденсатор охлаждающей воды, что приводит к ухудшению вакуума и падению КПД паровой турбины.

Так встает задача повышения эффективности работы паровой турбины в летнее время за счет снижения температуры охлаждающей воды, подаваемой в конденсатор.

Известно, что в летнее время вода является холодным источником и, согласно второму началу термодинамики, для понижения ее температуры необходимо затратить энергию на работу холодильной установки. При этом в летнее время имеется определенный избыток пара, ранее затрачиваемый на покрытие теплофикационной нагрузки. В данной работе предлагается перенаправить часть пара из проточной части турбины через регулируемый теплофикационный отбор на парожекторную или абсорбционную холодильную установку. Полученный таким путем холод можно использовать для дополнительного охлаждения воды, идущей в конденсатор, и таким образом улучшить вакуум и увеличить полезный теплоперепад.

Следует отметить, что холодильный коэффициент парожекторной холодильной машины ($\approx 0,2$) ниже, чем у абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины ($\approx 0,8$) [2]. Таким образом, с термодинамической точки зрения, более целесообразным является использовать абсорбционные бромистолитиевые холодильных машин (АБХМ). При этом температура пара на выходе из АБХМ будет не ниже $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

Литература

1. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2002.
2. Бараненко А.В., Пекарев В.И., Темофеевский Л.С. Холодильные машины. СПб.: Политехника, 1997.
3. ООО "ОКБ ТеплоСибМаш". URL:<http://www.teposibmash.ru>.

К. И. Диянов, студ.; рук. В.С. Агабабов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТИПА

В настоящее время в российской энергетике используется принцип когенерации. Но также жители и предприятия нуждаются в холоде. Эффективность хладоснабжения потребителей можно повысить, если заменить существующее хладоснабжение на централизованное. В статье [1] доказано, что данная область представляется весьма перспективной.

На данный момент выполняется расчет эффективности тригенерационной установки на базе паровой турбины К-300-300 с использованием термотрансформатора парокompрессионного типа (ПКТТ), работающего в режиме совмещенной генерации. Структурная схема данной установки приведена на рисунке 1.

Особенность работы установки в том, что часть выработанной в ПТУ электроэнергии отпускается в общую сеть энергосистемы, а часть ее используется для работы компрессора ПКТТ. ПКТТ, работая в совмещенном режиме, отпускает потребителю тепло и холод. Таким образом, обеспечивается централизованное снабжение потребителей электроэнергией, теплом и холодом. Преимущество данной установки в том, что теплоснабжение реализуется за счет использования низкопотенциальной теплоты, а местные источники холода заменяются централизованным источником большей мощности КПД которого должен превышать КПД малых источников.

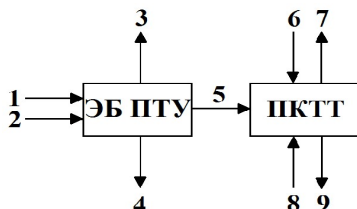


Рис. 1 Структурная схема тригенерационной установки с турбиной К-300-300 и ПКТТ: 1 — подача топлива, 2 — подача воздуха, 3 — уходящие газы, 4 — электроэнергия в сеть, 5 — электроэнергия на компрессор ПКТТ, 6 — вход теплоносителя, 7 — отпуск тепла потребителю, 8 — вход хладагента, 9 — отпуск холода потребителю, ЭБ ПТУ — энергоблок на базе ПТУ конденсационного типа, ПКТТ — парокompрессионный термотрансформатор

Литература

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, И.П. Ильина и др. // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36—43.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Базовым вектором обновления современной теплоэнергетики является ввод в эксплуатацию энергетических парогазовых установок (ПГУ). Характерной особенностью современных ПГУ является выработка значительной доли мощности газотурбинной установкой (ГТУ), что обеспечивает меньшие потребности ПГУ в охлаждающей воде и меньшее тепловое загрязнение окружающей среды по сравнению с паротурбинными установками равной мощности. Одним из направлений повышения эффективности ПГУ является внедрение газотурбинных установок с впрыском водяного пара, КПД которых может достигать 50% и выше, а коэффициент использования теплоты топлива достигает 90% [1, 2].

Для повышения надежности работы и экономичности парогазовой установки предлагается часть отработавшего в паровой турбине и содержащего капельную влагу водяного пара направлять в поток воздуха, поступающего в турбокомпрессор ГТУ с целью образования паровоздушной смеси и подачи ее в турбокомпрессор [3]. Капельная влага, содержащаяся в водяном паре, является обессоленной водой, что исключает выпадение солей и других примесей на лопатках турбокомпрессора. Кроме того, паровоздушная смесь имеет лучшие теплофизические свойства по сравнению с атмосферным воздухом, что позволяет уменьшить работу сжатия в турбокомпрессоре и одновременно повысить экономичность и мощность газовой турбины. Уменьшение работы сжатия в турбокомпрессоре дополнительно осуществляется и за счет снижения температуры сжимаемой паровоздушной смеси вследствие испарения содержащейся в ней капельной влаги. Увеличение мощности газовой турбины обусловливается наличием в продуктах сгорания водяных паров, что приводит к повышению располагаемого теплоперепада в газовой турбине. Кроме того, подача в камеру сгорания газотурбинной установки паровоздушной смеси уменьшает содержание оксидов азота в продуктах сгорания, то есть количество вредных выбросов в атмосферу и увеличивает срок службы высоконапряженных элементов ГТУ за счет снижения температуры газов в камере сгорания.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.
2. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 210 с.
3. **Патент 2482292 (РФ).** Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, А.С. Сергеева, С.П. Горланов. Опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14. 7 с.

К.А. Касаткин, студ.; рук. Г.Г. Орлов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ВОСПОЛНЕНИЕ УТЕЧЕК ПАРА И ВОДЫ В ЦИКЛЕ ТЭС ПУТЕМ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Стремление создать малоотходные технологии при получении электроэнергии на ТЭС с парогазовыми установками приводит исследователей к разработке комбинированных установок для получения не только электроэнергии и тепла, но и углекислоты и обессоленной воды из уходящих дымовых газов [1].

На рис. 1 представлена установка для получения обессоленной воды из уходящих дымовых газов ТЭС для компенсации утечек в ее цикле при сжигании газового топлива. Влага из дымовых газов котельного агрегата выделяется в контактном теплообменнике путем конденсации водяных паров из уходящих газов, отдавая тепло воде, циркулирующей по контуру: контактный теплообменник – вакуумный испаритель. Образовавшийся в испарителе пар направляется в поверхностный регенеративный подогреватель, а его конденсат – в конденсатор турбины на компенсацию утечек.

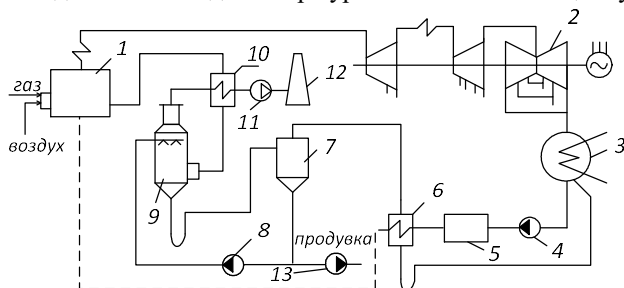


Рис. 1. Установка для получения конденсата из уходящих дымовых газов котельного агрегата: 1 — котельный агрегат; 2 — турбогенератор; 3 — конденсатор; 4 — конденсатный насос; 5 — блочная обессоливающая установка; 6 — подогреватель низкого давления; 7 — вакуумный испаритель; 8 — циркуляционный насос; 9 — контактный теплообменник; 10 — подогреватель уходящих газов из теплообменника 9; 11 — дымосос; 12 — дымовая труба; 13 — насос продувки

Как показали проведенные расчеты применительно к блоку 800 МВт, в контактном теплообменнике можно получить от 32,0 до 47,0 т/ч конденсата водяных паров из уходящих газов, что вполне достаточно для компенсации утечек в цикле. Срок окупаемости установки не превышает трех месяцев, а мощность собственных нужд установки менее 200 кВт.

Литература

1. А.С. 78438 от 22.09.1980 / Орлов Г.Г. / М. кл³F 25 В 29/00 // Опубликовано 23.01.1981. Бюллет. изобр. № 3.

В.О. Киндра, асп.; А.А. Егоров, студ.; рук. А.А. Дудолин, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С МНОГУСТУПЕНЧАТЫМИ КОМПРЕССОРАМИ

Важной задачей при проектировании тепловых схем отопительных ГТУ-ТЭЦ является разработка энергоэффективных способов предотвращения низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева газодляного теплообменника (ГВТО) в неотапительный сезон, когда температура обратной сетевой воды ниже минимально допустимой [1].

Авторами разработана тепловая схема когенерационной газотурбинной энергетической установки (КГЭУ), приведенная на рис. 1, в которой данная проблема решается за счет применения двухступенчатого сжатия воздуха в компрессоре с промежуточным охлаждением в водовоздушном теплообменнике (ВВТО). Предварительный нагрев сетевой воды в ВВТО позволяет не только уменьшить затраты на сжатие воздуха, повысить вырабатываемую тепловую и электрическую мощность, но и снизить вероятность низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева ГВТО.

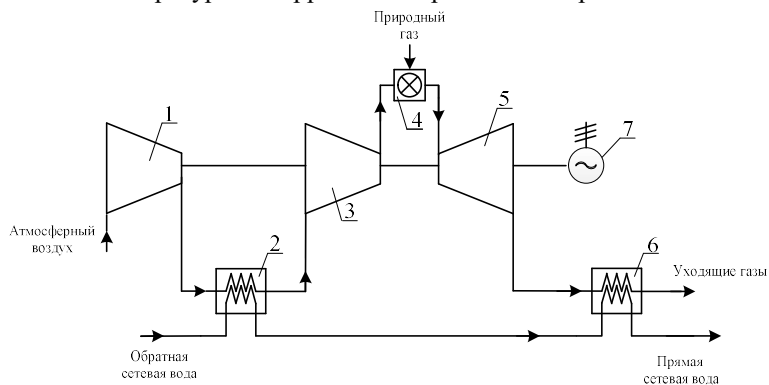


Рис. 1. Принципиальная схема КГЭУ: 1 — компрессор низкого давления; 2 — ВВТО; 3 — компрессор высокого давления; 4 — камера сгорания; 5 — газовая турбина; 6 — ГВТО; 7 — электрогенератор

Максимальная энергоэффективность КГЭУ с многоступенчатыми компрессорами достигается проведением оптимизации распределения степеней повышения давления между компрессорами и начальной температуры газа перед турбиной.

Литература

1. Патент на полезную модель №160537 от 25.02.2016. Авторы: Киндра В.О., Буров В.Д., Комаров И.И., Лисин Е.М., Гаранин И.В.

*Л.О. Колякина, В.А. Никитина, студенты;
рук-ли Е.В. Макаревич, к.т.н., доц.; А.С. Соболев, асс. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЭЦ, РАБОТАЮЩИХ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

В энергетической стратегии РФ особое внимание уделяется развитию топливно-энергетического комплекса. Одним из основных факторов, сдерживающих развитие ТЭК, признана деформация соотношения цен на газ и уголь. Также нельзя забывать про тот факт, что на единицу произведенной электроэнергии с использованием угля в атмосферу выбрасывается значительно больше NO_x , CO и SO_x , чем при сжигании природного газа. Эти факторы, как и многие другие, сказались на ориентации станций на сжигание газообразного топлива [1].

Эффективную модернизацию устаревших угольных ТЭЦ можно осуществить преобразованием оборудования ПСУ в парогазовые установки (ПГУ). В этом варианте к существующему энергетическому котлу, работающему на твердом топливе, устанавливается современная газовая турбина, использующая газифицированный уголь, что преобразует работающий энергоблок в ПГУ сбросного типа. При этом создается возможность реализовать более экономичный цикл выработки тепла и электроэнергии [2].

В работе рассматривалась модернизация существующих угольных ТЭЦ с теплофикационными турбинами типа Т-110/120-130 с применением парогазовой технологии. Исследования выявили следующие преимущества данного метода:

- существенно улучшаются экологические показатели;
- значительно увеличивается регулировочный диапазон энергоблока;
- возможность достижения КПД энергоблока по выработке электроэнергии не менее 45 % на отечественном оборудовании, что соответствует лучшим зарубежным аналогам.

Также следует отметить ряд недостатков при разработке такого типа ТЭЦ:

- технологические процессы отпуска электроэнергии и тепла сложнее, чем на аналогичных действующих станциях данной мощности;
- высокие капитальные затраты.

Литература

1. **Кожуховский И.С.** Роль энергетической стратегии России в развитии отраслей ТЭК // [Электронный ресурс]. Журнал «Энергетическая политика». № 2. 2013. Электронная версия.

2. **Сучков С.И.** Разработка отечественной технологии газификации твердого топлива для парогазовых установок. М., НТФ «Энергопрогресс», приложение к журналу «Энергетик». 2013. Выпуск 7 (175). 120 с.

А.П. Кравченко, Д.О. Чугунов, студенты;
рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф. (СамГТУ, г. Самара)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ БЕЗЫМЯНСКОЙ ТЭЦ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХКОНТУРНОЙ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИОННОГО ТИПА

Оборудование Безымянской ТЭЦ состоит из двух блоков: среднего и высокого давления. В блок среднего давления входят: два котла КО-Ш-200, два - KSG-140, один - ТКП-3-200; турбина Р-14-29/7 и две турбины Т-25-29. В блок высокого давления входят: три котла ТП-230, один - БКЗ-220; турбины Т-46-90/1,2, ПТ-25-90/1,2, Т-25-90, ПР 23,7-90/10-0,9 [1].

Для повышения экономичности Безымянской ТЭЦ на первом этапе ее реконструкции предлагается осуществить замену котлоагрегатов и паротурбинных установок блока среднего давления на двухконтурную ПГУ утилизационного типа [2]. ПГУ включает две газотурбинные установки ГТЭ-160 с двухконтурными котлами-утилизаторами П-90 и одну паровую турбину Т-150. Произведен расчет парогазовой установки и выполнен экономический анализ работы оборудования [2, 3], установлено:

Электрический КПД ПТУ:

$$\eta_3^{\text{ПТУ}} = N_3^{\text{ПТ}} / 2Q_{\text{КУ}} = 139011 / 474104 = 0,293, \quad (1)$$

Абсолютный электрический КПД ПСУ:

$$\eta_{\text{ПСУ}} = N_3^{\text{ПТУ}} \eta_{\text{КУ}} = 0,293 \cdot 0,803 = 0,235. \quad (2)$$

Электрическая мощность ПГУ:

$$N_3^{\text{ПГУ}} = N_3^{\text{ГТУ}} + N_3^{\text{ПТ}} = (2 \cdot 160\,000) + 139011 = 459011 \text{ кВт}. \quad (3)$$

Электрический КПД брутто ПГУ:

$$\begin{aligned} \eta_3^{\text{ПГУ}} &= \eta_3^{\text{ГТУ}} \left(1 - \eta_3^{\text{ГТУ}}\right) \eta_{\text{КУ}} \eta_3^{\text{ПТУ}} = \\ &= 0,357(1 - 0,357) \cdot 0,803 \cdot 0,293 = 0,5082 \text{ (50,82 \%)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Удельный расход условного топлива:

$$b_{\text{удл}} = 123 / \eta_3^{\text{ПГУ}} = 123 / 0,5082 = 242,03 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}. \quad (5)$$

Экономический анализ показал: дисконтированный срок окупаемости при ставке дисконтирования 12 % составляет 13 лет; себестоимость электроэнергии – 1,36 руб./кВт·ч; тепловой энергии – 220 руб./Гкал; КПД brutto ПГУ по выработке электроэнергии – 50,82 %.

Литература

1. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.
2. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Парогазовые установки тепловых электрических станций: Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 210 с.
3. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 580 с.

Ю.В. Куцева, студ.; рук. А.А. Сухих, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОАСОСНОЙ УСТАНОВКИ И ДРУГИХ ГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОТЫ

Для сравнения эффективности теплонасосных установок (ТНУ) и традиционных генераторов теплоты, например котельных, применяют обобщенный критерий коэффициент использования первичной энергии K . Теплоснабжение прямым сжиганием топлива в котельной приводит к потере около 20 % первичной энергии. Коэффициент использования первичной энергии примерно равен КПД котельной: $K_{\text{кот}} = 0,75 \dots 0,85$ [1].

Для ТНУ коэффициент использования первичной энергии (топлива) оценивается по формуле:

$$K_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{BQ_p}, \quad Q_{\text{ТНУ}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент преобразования теплоты; N — мощность электропривода ТНУ, BQ_p — тепловая мощность при сжигании топлива с расходом B , необходимая для производства электрической мощности привода ТНУ — N на ТЭС либо КЭС. Принимая некоторое значение КПД станции (несколько выше среднего) равное 0,4 получим, что $BQ_p = 0,4N$.

Тогда $K_{\text{ТНУ}} = 0,4\mu$. При обеспечении рационального режима работы ТНУ и соответствующей реальной конфигурации цикла и температурных напоров в теплообменных аппаратах ТНУ вполне реально получить $\mu = 3,4$, тогда $K_{\text{ТНУ}} = 1,36$, т.е. при полном замещении котельной на ТНУ экономия первичного топлива достигает 50—60 %.

В случае применения теплонасосных технологий на центральных тепловых пунктах (ЦТП): появляется возможность увеличить пропускную способность отопительных сетей в условиях постоянного роста потребления тепла, а также позволит реализовать энергосберегающее теплоснабжение [2].

Литература

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. — 7-е изд., стереот. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 472 с.
2. **Чаховский В.М.** Опыт применения энергосберегающей теплонаносной технологии в системе городского теплоснабжения.// РСЭ. Информ. 1999. № 2.

А.М. Латыпов, асп.; рук. С.В. Цанев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛА АЭС И ГТУ ПАРОГАЗОВОЙ СХЕМЫ

Возможно создание парогазовых установок на базе двухконтурных атомных электростанций на насыщенном водяном паре (АПГУ), работающих по парогазовому циклу [1]. Существует несколько вариантов комбинирования: использование уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ).

Анализ ранее полученных результатов показывает, что наибольшими потенциальными возможностями обладает АПГУ с газовым промперегревом пара. Эти возможности, однако, можно реализовать только на блоке электрогенератора мощностью 1200 МВт в паре с турбиной К-1000-60/3000 ЛМЗ [2]. Расчеты показали, что данный вариант комбинирования имеет высокие показатели энергетической эффективности, КПД атомного энергоблока работающего по парогазовой схеме достигает 37,87% , что выше, чем у других вариантов исполнения.

Однако несмотря на высокие показатели энергетической эффективности всевозможных комбинированных установок ГТУ и АЭС, их техническая реализация является очень сложной и важной задачей, затрагивающая разные направления развития современной энергетики. При расчете паросиловой части остро встала проблема с пропускной способностью цилиндров низкого давления. Для решения данной проблемы потребуется установка двухъярусной проточной части ЦНД, где верхний ярус представляет собой независимый от нижнего яруса лопаточный аппарат [3]. Также стоит отметить проблему обеспечения должного уровня безопасности на АПГУ, так как подвод органического топлива на АЭС сопряжен с различными рода рисками. Поэтому необходимо более подробно исследовать данный вариант с точки зрения технической реализации.

Литература

1. **Цанев С.В., Бузов В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Перспективы** применения двухъярусных проточных частей в цилиндрах низкого давления мощных паровых турбин / А.С. Седлов, А.Е. Зарянкин, А.Н. Роголев и др. // Вестник ИГЭУ. 2016. № 2. С. 2—7.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПГУ-ТЭЦ В ЭНЕРГЕТИКЕ КИТАЯ

Как известно, китайская энергетика преимущественно опирается на угольное топливо. Однако в последние годы в Китае заметно снизились темпы добычи угля. Так, по состоянию на 2015 году объем добычи угля составил 3,68 миллиарда тонн. В структуре потребления первичной энергии, потребление угля составляет 66,2 %, нефти – 18,4 %, на долю природного газа от общего потребления энергии приходится 5,6 % [2]. Нефть и газ в Китае это преимущественно импортируемые ресурсы, где на долю нефти приходился более 60 %, а импорт газа составляет более 30 % от общего объема углеводородов [1].

Согласно новой энергетической стратегии Китая начат процесс постепенного перехода с угольных ТЭС, на газовые. В этой связи возрос интерес к внедрению газотурбинных и парогазовых технологий. В 2015 году, китайский рынок газовых турбин оценивался в 30 миллиардов китайских юаней, и согласно стратегическим планам будет увеличиваться и дальше. Так, к 2020 году, мощность китайских газотурбинных и парогазовых ТЭЦ должна составить 55000 МВт.

В качестве объекта научного исследования выбран дубльблок ПГУ-ТЭЦ на базе ГТУ PG9351FA фирмы GE, который находится в Пекине. Электрическая мощность блока — 780 МВт, а годовая выработка электроэнергии 3,4 миллиарда кВт·ч. Годовая выработка тепла от ТЭЦ составляет 3,1 миллиона ГДж, а расход природного газа — 0,7 миллиарда куб.м. Сетевая теплофикационная установка подает воду с максимальной температурой 130 °С в городскую теплофикационную сеть для обеспечения централизованного теплоснабжения.

В результате расчетной оптимизации будут выбраны оптимальные параметры и режимы эксплуатации ПГУ-ТЭЦ для условий г. Пекина (Китай).

Литература

1. **Бе Фань.** Энергетика Китая в 2015 году // Китайская энергетическая газета. 2016. № 15. С. 1—2.
2. **Цзоу Цайнэн.** Ископаемое топливо и возобновляемая энергия // Китайский природный газ. 2016. № 1. С. 1—10.

*А.М. Литвинов, студ.; рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф.
(СамГТУ, г. Самара)*

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ КС-1 ООО «РН-ЮГАНСКНЕФТЕГАЗ»

ООО «РН-Юганскнефтегаз» – ведущее предприятие НК «Роснефть», одно из крупнейших нефтедобывающих предприятий России. В состав ООО «РН-Юганскнефтегаз» входит Компрессорная станция КС–1, которая предназначена для подготовки попутного нефтяного газа. На территории КС–1 установлены три газоперекачивающих агрегата типа ГПА–12 ДКС "Урал" единичной мощностью по 12 МВт со своими линиями подготовки нефтяного газа.

Возможным способом повышения эффективности работы ГТУ газоперекачивающих агрегатов и снижения затрат на топливо для отопления зданий на компрессорной станции КС–1 является установка на «выхлопе» ГТУ котлов–утилизаторов для подогрева сетевой воды [1, 2]. В случае установки котлов–утилизаторов работающие в настоящее время водогрейные котлы ВК-21 выводятся в резерв, при этом затраты на топливо для котлов ВК-21 снизятся.

Разработана схема утилизации теплоты уходящих газов газотурбинных агрегатов типа ГПА–12 дожимной компрессорной станции КС–1. Выполнены теплотехнический расчет и расчет экономической эффективности. В качестве исходных данных были приняты температура воды на входе в котел–утилизатор и на выходе из него, энтальпии теплоносителей, стоимость топлива [3].

Экономический эффект в денежном выражении за счет подогрева сетевой воды в котлах–утилизаторах ГПА–12 составляет 11506704 рублей в год.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 580 с.
2. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие для вузов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 210 с.
3. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Энергосбережение в котельных установках ТЭС и системах теплоснабжения. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.

*Осама Аль Кайси, студ. (Ирак); рук. Д.В. Сиденков, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИРАКА

Предложена схема комбинированной установки электротепло(холодо)-снабжения в составе паросиловой установки и теплонасосной установки на низкокипящем рабочем веществе [1] для локальных потребителей в климатических условиях Ирака. Представлена возможность применения различных рабочих веществ в циклах этих установок [2], что будет способствовать повышению эффективности таких тригенерационных систем. Проведен расчет циклов паротурбинной и теплонасосной части на выбранных рабочих веществах при наличии грунтового теплообменника в схеме установки. Предложено использовать теплообменные аппараты пластинчатого типа в качестве основных теплообменников и трубчатый грунтовый теплообменник в данной комбинированной установке. Разработана методика теплогидравлического расчета теплообменников, реализованная в пакете MathCad, что позволяет оперативно оценивать эффективность установок подобного типа. Для выбранных рабочих веществ паросиловой части определена оптимальная температура подвода теплоты в парогенераторе, подобрано теплосиловое оборудование.

Литература

1. **T. Guo***, **H.X. Wang**, **S.J. Zhang**. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources. China, Tianjin 300072, 2011.
2. **Bernardo Peris**, **Joaquín Navarro-Esbrí**, **Francisco Molés**. Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery. Spain, E12071 Castellón, 2013.

Э.Н. Салихова, студ.; рук. А.А. Сухих, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЯ НА ЦТП

Разработка схемы автономного (аварийного) электрообеспечения на центральном тепловом пункте (ЦТП) является актуальной задачей, поскольку возможны остановы насосов в случае перебоев с электроснабжением. Предлагается энергетическая установка на низкокипящем рабочем веществе по выработке электрической энергии на утилизации некоторой части теплоты от потока прямой воды на площадке ЦТП. В составе ЦТП возможна реализация рабочей схемы по охлаждению конденсаторов холодной водой, которая поступает для нагрева в систему ГВС, в этом случае теплота не сбрасывается в окружающую среду подобно энергоустановкам ТЭЦ, КЭС и АЭС, а уходит к потребителю. Расчеты затрат показывают также высокую энергетическую эффективность такой схемы.

Использование фреонов в качестве рабочего тела энергоустановки позволит обеспечить работу турбины в зоне перегретого пара [1]. Параметры для проектирования термодинамического цикла такой установки выбираются с учетом температурного графика прямой и обратной воды. По температуре, давлению, энтальпии точек цикла определены удельные характеристики цикла (работа турбины, нагрузка на теплообменники, работа насоса). Номинальная электрическая мощность определяется расходом сетевой воды в выбранном для реализации проекта ЦТП.

С использованием специализированной программы REFPROP [2] были получены: электрическая мощность $N_э$, равная 600 кВт, которой хватит на покрытие 47 % от собственных нужд ЦТП с нагрузкой ГВС. Оценочные расчеты показывают, что полного покрытия собственных нужд ЦТП за счет работы электрогенерирующих модулей можно достичь на режимах с превышением температуры прямой сетевой воды утвержденного графика на 30—40 °С. Проведенные расчеты показывают, что при реализации предлагаемой схемы стоимость единицы выработанной электроэнергии может быть существенно ниже, чем на КЭС, т.к. циркуляционная вода конденсаторов уходит на подогрев подпиточной воды в систему ГВС.

Литература

1. Гохштейн Д.П., Смирнов Г.Ф., Киров В.С. Некоторые особенности парогазовых схем с неводяными парами // Теплоэнергетика. 1966. № 1. С. 20—24.
2. REFPROP 9.0: Reference Fluid Thermodynamic and Transport properties: Copyright 2007 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the USA.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРООХЛАДИТЕЛЯ, УСТАНОВЛЕННОГО НА ОТБОРЕ ПАРА К СУШИЛКЕ ВЛАЖНОГО ТОПЛИВА

При сжигании на ТЭС влажных бурых углей иногда применяют их паровую подсушку в специальных сушилках, что позволяет повысить теплотворную способность топлива за счет испарения влаги из него и создать более компактный котельный агрегат [1]. Поскольку температура пара на входе в сушилки не должна превышать 180 °С, то для ее снижения впрыскивают воду (рис. 1, позиция 12). Более рациональным вариантом является установка пароохладителя (ПО) на потоке пара, отбираемого к сушилке (рис. 1). Эффективность установки ПО оценивалась по методу коэффициентов изменения мощности [2].

Стоимость топлива, сжигаемого на ТЭС, существенно влияет на срок окупаемости ПО и его оптимальные характеристики: поверхность нагрева, температурные напоры, количество воды, отводимое на ПО. Автором проведен технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности ПО, получены графические зависимости оптимальных характеристик такого ПО применительно к блоку 500 МВт с турбиной К-500-240 ЛМЗ.

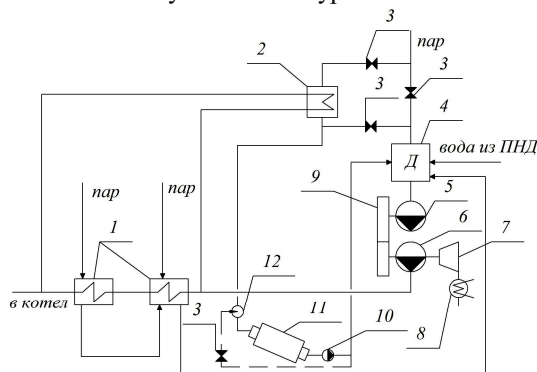


Рис. 1. Схема охлаждения пара, подаваемого на сушку топлива: 1 — ПВД; 2 — ПО; 3 — запорная арматура; 4 — деаэратор; 5 — БН; 6 — ПН; 7 — турбопривод питательного насоса; 8 — конденсатор; 9 — редуктор; 10 — КН; 11 — топливная паровая трубчатая сушилка; 12 — впрыскивающее устройство для снижения температуры

Литература

1. Михайлов Н.М. Сушка топлива на тепловых электростанциях. М.: Госэнергоиздат, 1957.
2. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС.

М.В. Старчак, студ.; рук. Е.В. Макаревич, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРОГАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ПАРОТУРБИННОГО БЛОКА МОЩНОСТЬЮ 260 МВт

Около 70% электроэнергии в России производится на ТЭС, при этом значительная доля приходится на конденсационные блоки типа К-300-240, К-500-240, К-800-240, введенные в эксплуатацию в 60-70 гг. XX века. Более половины из них уже достигли или превысили свой парковый ресурс и нуждаются в обновлении [1].

Одним из возможных путей обновления является модернизация тепловой схемы с применением парогазовой технологии. Для модернизации блока К-260-240 предлагается применить два энергоблока ПГУ единичной мощностью порядка 135 МВт, выполненных по дубль-блочной схеме с использованием ГТУ типа SGT-800 фирмы «Сименс», утилизационных паровых котлов типа П-108 и паротурбинной установки типа SST-РАС400 фирмы «Сименс» [2].

Таблица 1

Основные результаты определения энергетических показателей энергоблоков

Величина	К-260-240	ПГУ-ТЭС
<i>Показатели брутто</i>		
Электрическая мощность блока, МВт	260	269,8
Полный расход натурального топлива, м ³ /с	18,43	14,84
КПД по выработке электроэнергии, %	41,5	54,3
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г/(кВт·ч)	296,3	226,2
<i>Показатели нетто</i>		
Электрическая мощность блока, МВт	253,5	264,4
КПД по отпуску электроэнергии, %	40,2	53,2
Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии, г/(кВт·ч)	306,0	231,7

Проведенные расчеты показали [3], что применение парогазовой технологии для модернизации конденсационных блоков сопоставимой мощности позволяет снизить удельный расход топлива.

Литература

1. **Стерман Л.С., Лавыгин В.М., Тишин С.Г.** Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов. — 5-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 464 с., ил.
2. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2009. 584 с., ил.
3. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов по направлениям "Энергетическое машиностроение", "Теплоэнергетика и теплотехника". М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

На протяжении всего времени энергия является неотъемлемой частью жизни человечества. Сегодня в среднем на одного человека вырабатывается около 20 МВт·ч/год, а суммарное потребление энергии более 120 миллиардов МВт·ч/год, и это значение постоянно увеличивается.

Развитие городов и увеличение численности в них приводит к ряду проблем: интенсивное и надежное энергоснабжение, соблюдение экологических норм, развитие линий электропередачи и транспорта. В связи с этими проблемами и ростом энергопотребления требуется разработка новых энергетических технологий [1].

Развитие систем энергоснабжения происходит в условиях значительного роста цен и тарифов на органическое топливо, тепловую и электрическую энергию. В настоящее время перспективной базой в энергетике становится интеллектуализация технологического оборудования, объектов, систем энергетики. Основные положения программы инновационного интеллектуально-технологического развития отечественной электроэнергетики заключаются в следующем:

- переоценка традиционных современных энергетических технологий с позиций прогрессивных информационных инноваций, глобальной автоматизации и роботизации процессов управления;

- широкое и глубокое диагностирование оборудования, мониторинг состояния оборудования и систем;

- постепенное превращение управляемых объектов и окружающей их среды в «цифровую реальность», регулируемую интеллектуальными ресурсами, в том числе и искусственным интеллектом [2].

Основной проблемой энергоснабжения является невозможность накапливать и хранить электроэнергию. В связи с чем требуется постоянный мониторинг количества потребляемой и вырабатываемой энергии. Из-за неравномерности суточного графика потребления электроэнергии возникает проблема сглаживания пиков и провалов электроэнергии. В качестве решения поставленной проблемы возможно использование аккумуляторов либо накопителей электрической энергии.

Литература

1. **Извеков А.В.** Энергоснабжение городов и промышленных предприятий: учебное пособие по курсу «Энергоснабжение». М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

2. [Электронный ресурс]. URL: <http://esco.co.ua/journal>

*Е.М. Фёдорова, И.А. Васильев, студенты;
рук. Е.Н. Олейникова, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ГИДРОМУФТОЙ НА ПИТАТЕЛЬНОМ НАСОСЕ

В настоящее время актуален поиск путей по применению методов энерго- и ресурсосбережения. Один из способов — оптимизация режимов работы основного и вспомогательного оборудования, повышение его эффективности и надежности. Вследствие переменных режимов энергоблоков ТЭС ухудшается надежность эксплуатации как основного тепломеханического оборудования, так и механизмов собственных нужд (СН). Частые пуски и остановы энергоблоков, изменения их нагрузок сопровождаются дополнительными потерями из-за неоптимальных режимов работы основного оборудования и механизмов СН вследствие необходимости дросселирования теплоносителей [1].

В исследовании был произведен расчет конденсационного энергоблока с турбиной К-335-23,5. Топливо – природный газ. Проведено сравнение показателей двух конфигураций схем: с турбинным (ПТН) и электрическим (ПЭН) приводами питательного насоса энергоблока. Вариант схемы с ПЭН был рассмотрен как с гидромуфтой, так и без нее. Основные энергетические показатели исследуемых схем приведены в табл. 1. В результате расчетов получены показатели тепловой экономичности модернизированного энергоблока, таким образом, замена ПТН на ПЭН привела к увеличению КПД нетто на 1,4 %.

Таблица 1

Показатели тепловой экономичности энергоблока с турбиной К-335-23,5

Наименование/конфигурация схемы	ПТН	ПЭН	ПЭН с гидромуфтой
Мощность энергоблока брутто	335 МВт		
Мощность энергоблока нетто	329,54 МВт	313,56 МВт	313,764 МВт
Расход натурального топлива на блок	23,82 м ³ /с	22,92 м ³ /с	22,92 м ³ /с
Низшая рабочая теплота сгорания	34,16 МДж/м ³		

Литература

1. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41—48.

К.М. Чубаров, Н.В. Сенько, студенты;
рук. Ю.П. Кубарьков, д.т.н., проф. (СамГТУ, г. Самара)

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ КРУПНЫХ АВАРИЙ НА ТЕПЛОВЫХ СТАНЦИЯХ

Современная электроэнергетика нуждается в систематизации и поиске рациональных решений проблем, связанных с аварийными ситуациями, возникающими в корпусах тепловых электростанций (ТЭС). К техногенным опасностям ТЭС относятся взрывы, пожары в машинных отделениях корпусов ТЭС, гидродинамические волны прорыва на резервуарах мазутного хозяйства и ХВО [1], выбросы химически опасных веществ (рис. 1).

Авторами установлено, что основной причиной крупных аварий на ТЭС являются пожары в машинных отделениях электростанции, связанные с нарушением целостности смазки и регулирование агрегатов, содержащих масло, используемое в больших количествах для эксплуатации турбин. Частота возникновения крупных аварий при выходе из строя одного и более генераторов составляет 0,0034 аварий/энергоблок·год [2]. Авторами разработана компьютерная модель расчета технико-экономических показателей последствий аварий на основе определения коэффициентов готовности (K_r):

$$K_r = \sum_{i=1}^k t_{Hi} / \left(\sum_{i=1}^k t_{Hi} + \sum_{i=1}^k t_{Vi} + \sum_{i=1}^k t_{Pi} \right), \quad (1)$$

где t_{Hi} , t_{Vi} , t_{Pi} — время нормальной работы, восстановление оборудования после аварий, простой в плановом режиме.

Увеличение K_r приводит к повышению стоимости вырабатываемой электроэнергии. Результаты проведенных исследований показали, что для анализа последствий крупных аварий на ТЭС можно использовать разработанную авторами компьютерную модель.

Литература

1. Белов В.В., Пергаменщик Б.К. Крупные аварии на ТЭС и их влияние на компоновочные решения главных корпусов // Вестник МГСУ. 2013. № 4.
2. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Саратов: Саратов.гос.тех.ун-т, 2002.



Рис. 1. Основные причины крупных аварий на ТЭС

Д.О. Чугунов, А.П. Кравченко, студенты;
рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф. (СамГТУ, г. Самара)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСШИРЕНИЯ САМАРСКОЙ ТЭЦ ГТУ С КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ

На Самарской ТЭЦ установлено пять паровых котлов БКЗ-420-140 НГМ и пять паровых турбин: три турбины Т-100/120-130-3 ($D_{\text{ном}} = 460$ т/ч), одна турбина Р-50-130/13 ($D_{\text{ном}} = 450$ т/ч) и ПТ-60-130/13 ($D_{\text{ном}} = 387$ т/ч) [1].

Общее количество пара для работы турбин при номинальных параметрах $D = 2217$ т/ч. Максимальный расход пара энергетических котлов станции при работе турбин в номинальном режиме, учитывая расходы на собственные нужды и потери должен составлять [2]

$$D_{\text{кот}}^{\text{макс}} = D + a_{\text{сн}} D = 2217 + 0.06 \cdot 2217 = 2350 \text{ т/ч.} \quad (1)$$

Количество производимого пара котлами БКЗ 420-140 НГМ:

$$D_{\text{выр}} = 5 D_{\text{выр}} = 5 \cdot 420 = 2100 \text{ т/ч.} \quad (2)$$

Недостающее количество пара равно:

$$D_{\text{кот}}^{\text{макс}} - D_{\text{выр}} = 2350 - 2100 = 250 \text{ т/ч.} \quad (3)$$

Чтобы компенсировать недостаток пара предлагается установить на Самарской ТЭЦ две ГТУ GE MS6001FA с котлами-утилизаторами (КУ).

Выполнен расчет, определена тепловая мощность, полученная паром двух КУ [3, 4]: $Q = 224,6$ МВт; расход пара генерируемого двумя КУ: $D = 280$ т/ч; абсолютный электрический КПД брутто ПГУ: $\eta_{\text{Э}}^{\text{ПГУ}} = 0,5272$ (52,72%), электрическая мощность $N_{\text{Э}}^{\text{ГТУ}} = 151,8$ МВт.

Таким образом, количество производимого пара после реконструкции $D = 2100 + 280 = 2380$ т/ч, что позволяет полностью покрыть его дефицит.

Проведен экономический анализ проекта расширения ТЭЦ. Простой срок окупаемости капложений составляет 8 лет, себестоимость электроэнергии 3,19 руб/(кВт·ч); тепловой энергии 769,7 руб/Гкал.

Литература

1. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.
2. Кудинов А.А. Горение органического топлива: учеб. пособие для вузов. М.: ИНФРА-М, 2015. 390 с.
3. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 580 с.
4. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Парогазовые установки тепловых электрических станций: Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 210 с.

К.А. Шаган, студ.; рук. В.Е. Серенков, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ТОПЛИВА НА ТЭЦ

Одной из важнейших задач для функционирования генерирующих компаний на рынке электроэнергии является прогнозирование удельных расходов топлива b [г/(кВт·ч)] и b [кг/Гкал].

Сфера использования прогнозирования в условиях рыночной экономики существенно расширяется, его актуальность неизмеримо повышается в силу высокой экономической эффективности.

Целью данной работы является совершенствование системы прогнозирования на ТЭЦ.

При решении поставленной задачи были выделены три составляющих, от которых существенно зависит точность прогнозирования. Это определение электрической и тепловой выработки, выбор методики прогнозирования удельных расходов топлива и распределение электрической и тепловой нагрузки по агрегатам.

Определение выработки электрической и тепловой энергии проводилось на основе алгоритмов сезонных колебаний электрических нагрузок электроэнергетических систем [1].

Для прогнозирования удельных расходов был выбран метод, основанный на нормативных характеристиках основного оборудования ТЭЦ.

Точность прогнозирования удельных расходов топлива на основе нормативных характеристик существенно зависит от распределения электрической и тепловой нагрузки по агрегатам. Поэтому важным этапом при прогнозировании является распределение электрической и тепловой нагрузки по турбоагрегатам, тепловой мощности энергетических и водогрейных котлов, а также выбор режимов их работы.

Решение задачи оптимального распределения нагрузок по агрегатам станции является довольно сложной математической процедурой. В этой ситуации более целесообразным является подход, основанный на рациональном распределении электрической и тепловой нагрузки по агрегатам, исходя из опыта работы работников станции.

Литература

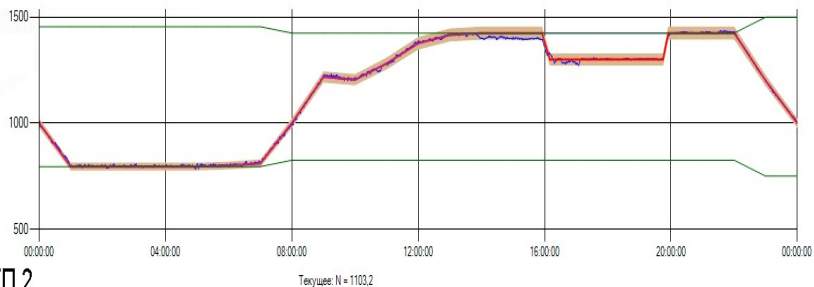
1. **Макоклюев Б.И., Костиков В.Н.** Моделирование электрических нагрузок электроэнергетических систем // *Электричество*. 1994. № 10.

Д.А. Юпатов, асп; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КОММЕРЧЕСКАЯ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ПРИ РАБОТЕ НА БАЛАНСИРУЮЩЕМ РЫНКЕ

Работа объектов генерации на балансирующем рынке напрямую влияет на финансовый результат компании. Поэтому операции, производимые при работе на БР, должны учитывать не только технологическое выполнение режима, но и финансовую сторону, что увеличивает актуальность коммерческой диспетчеризации.

ГТП 1



ГТП 2

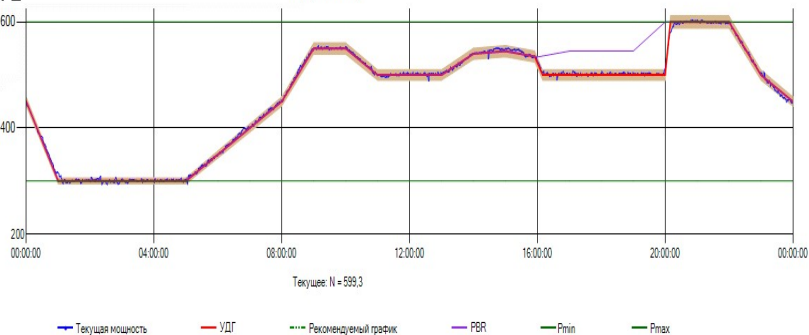


Рис. 1. Пример рекомендаций при работе на БР

Коммерческая диспетчеризация при работе на БР включает в себя несколько задач:

1. На основании рассчитанного УДГ на основании полученных данных о ТГ, ПБР, спорадических команд и текущей фактической выработке (ОИК, СТМ, АИЙСКУЭ) по ГТПГ, рассчитывается рекомендация по несению фактической нагрузки для уменьшения величины отклонения по ИС и максимизации функции финансового результата.

2. Расчет экономического эффекта при работе на БР. Производится оперативный расчет прогнозной прибыли при загрузке/разгрузки оборудования на БР. Целесообразность подачи ОЦПЗ [1].

3. Анализ влияния подачи ОЦПЗ на филиалы компании, при их наличии и корректировка целесообразности подачи заявки на БР.

4. Распределение заданной нагрузки (тепловой и электрической) по ТГ и максимизации функции финансового результата.

5. Оперативный расчет стоимости и объемов отклонения на БР[1].

Пример отчетной формы, учитывающей ведение режима с учетом рекомендаций по снижению ИС и команд диспетчера представлен на рис. 1 на примере Нижнекамской ТЭЦ-2.

Литература

1. Регламенты ОРЭМ.

Секция 46

КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент С.В. Мезин

Секретарь секции — ассистент Г.В. Фарафонов

П.А. Анисимова, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ШКАФНОЙ КОМПЛЕКТАЦИИ ОДНОГО ИЗ УРОВНЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Модернизация шкафной комплектации одного из уровней управления энергоблока АЭС является очень важным и сложным процессом. В ходе этого процесса необходимо учитывать, что модернизация должна осуществляться с сохранением общей концепции управления автоматизированной системы управления технологическим процессом АСУ ТП [1].

Целью модернизации является повышение надежности эксплуатации модернизируемой АСУ ТП.

Основанием для модернизации системы управления энергоблока АЭС являются:

- неработоспособность компонентов и элементов АСУ ТП;

- анализ информации о жизненном цикле оборудования.

На основании собранных данных определяется объем модернизации.

Стратегия модернизации основывается на следующих принципах:

- использование программного обеспечения;

- использование высоконадежной современной техники;

- открытость решения для дальнейшего расширения и развития системы;

- структурирование и иерархическая организация информации;

- повышение качества интерфейса «человек-машина»;

- сохранение существующей структуры АСУ ТП с разделением на два уровня автоматизации ;

- возможность использования применяемых программно-аппаратных решений при модернизации других СВУ.

Результатом работы по модернизации АСУ ТП на энергоблоке АЭС является ПТК СВУ соответствующий своему назначению.

Система в целом и ее технические средства должны быть модернизированы таким образом, чтобы при возникновении отказов в технических и программно-аппаратных средствах часть системы автоматически деградировала с сохранением независимого функционирования других элементов управления без снижения уровня безопасности эксплуатации.

Литература

1. **ГОСТ 34.601—90.** Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ БЛОКА ВВЭР-1000

Современная теория оптимального управления [1] предлагает ряд новых алгоритмов регулирования, реализуемых в промышленных контроллерах западных стран. Прежде чем определить позицию относительно целесообразности использования оптимальных алгоритмов, необходимо провести сравнительный анализ с общепринятыми в России типовыми алгоритмами.

В работе на примере системы регулирования тепловой нагрузки блока ВВЭР-1000 выполнено описание объекта в пространстве состояний

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{B}u ;$$

сделан синтез алгоритма максимального быстродействия на основе принципа максимума Понтрягина:

$$\sigma = (P_T - P_{\text{зад}}) + \text{sign} \left(n - \frac{P_{\text{зад}}}{K} \right) K T_1 S \left(e^{\left| n - \frac{P_{\text{зад}}}{K} \right| / (T_1 S)} - 1 \right) - K \left(n - \frac{P_{\text{зад}}}{K} \right);$$

$$u^*(t) = -\text{sign}(\sigma);$$

$$u^*(t) = 0, \quad \text{если} \quad \left| P - P_{\text{зад}} \right| \leq \varepsilon_1; \quad \left(n - \frac{P_{\text{зад}}}{K} \right) \leq \varepsilon_2,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — параметры зоны нечувствительности регулятора; с помощью метода динамического программирования и матричного нелинейного уравнения Риккати

$$\mathbf{P}' = -\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{P}\mathbf{B}q_2^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{Q}_1 - \mathbf{A}^T\mathbf{P}, \mathbf{P}(T) = 0$$

получен оптимальный алгоритм в виде векторного П-регулятора относительно переменных состояния; в качестве типового принят ПИД-регулятор, для которого проведена параметрическая оптимизация методом Дудникова.

Наличие запаздывание в объекте управления учитывалось, с помощью простейшего линейного прогноза регулируемой величины.

Моделирование системы с тремя перечисленными алгоритмами в среде MathCad показало, что лучшим по качеству стабилизации давления оказался регулятор максимального быстродействия.

Литература

1. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. С. 179—256.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ НЕПОЛНОГО ОТТОКА ЭНЕРГИИ

Одним из способов улучшения качества двухпозиционного регулирования, позволяющим расширить область применения двухпозиционных регуляторов, является метод неполного оттока энергии.

В качестве исследуемой выбрана система автоматического регулирования (САР) объекта с самовыравниванием при применении двухпозиционного регулятора и наличии запаздывания в системе. Диапазон колебания температуры определяется соотношением [1]:

$$\Delta t = k_{об} (B_1 + B_2) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right), \quad (1)$$

где B_2 — регулирующее воздействие регулятора на объект, характеризующее отток энергии.

Снижение значения отрицательной амплитуды (A_-) можно реализовать, если при достижении заданного значения температуры ($t_{здн}$) подачу энергии полностью не прекращать, а только уменьшать на некоторую величину (произойдет уменьшение B_2).

В данной работе произведено исследование САР при симметричных колебаниях в двух режимах: режим 1 — полный отток энергии (ток, протекающий через нагреватель при размыкании контактов реле $I_{откл} = 0$ А); режим 2 — неполный отток энергии ($I_{откл} = 0,45$ А).

Значения результатов исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования

Режим	$t_{здн}, ^\circ\text{C}$	$I_{откл}, \text{A}$	T, c	$A_-, ^\circ\text{C}$	$A_-, \%$
1	314,4	0	120	7,2	2,3
2	314,4	0,45	132	1,2	0,4

Таким образом, метод неполного оттока энергии является эффективным способом улучшения качества регулирования. При этом он позволяет облегчить режим работы двухпозиционного регулятора за счет уменьшения величины коммутируемой энергии. К недостаткам данного метода можно отнести увеличение периода колебаний T .

Литература

1. Клюев А.С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. — М.: Энергия, 1967. 104 с.

*Д.Ю. Быстрова, А.А. Шилов, А.А. Образцов, студенты;
рук. А.Н. Черняев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К АСУ ТП

Начальный этап написания Технического задания — это этап жизненного цикла, включающий в себя разработку и подбор требований, которым необходимо строго соответствовать. [1]. В настоящее время нет единой базы с требованиями для проектирования АСУ ТП, поэтому возникает ряд недостатков:

1. Постоянное обновление;
2. Большой объем данных;
3. Отсутствие возможности четкого разбиения требований по их приоритету и назначению (для АСУ ТП в целом, для системы, для оборудования и т.д.);
4. Лишняя трата времени на подборку требований, необходимых для конкретной задачи.

В настоящей работе предлагается создать универсальный классификатор требований, который будет представлять собой систематизированный перечень всех требований, каждому из которых будет присвоен свой уникальный код. Классификация будет производиться в соответствии с конкретной задачей, которую будет необходимо выполнить проектировщику системы. Подобный классификатор позволит:

1. Быстрее создать представление о будущей системе;
2. Оценить масштабы всех требований и их приоритетность;
3. По ходу написания документа иметь актуальные данные;
4. Обосновать выполнение требований от ЕРС-контракта и применимых руководств и стандартов;
5. Сэкономить время на поиске необходимого требования;
6. Выявить возможные несоответствия на ранних стадиях.

Данный классификатор упростит работу проектных организаций, занимающихся разработкой и анализом технической документации, и позволит развивать систему управления проектами создания АСУ, сократить сроки создания АСУ без потерь в качестве.

Литература

1. **ИСО/МЭК 15288-2005.** Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

В.В. Горайнова, студ.; рук. Т.Е. Щедркина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

Прямоточные котлы имеют развитую перегревательную часть водопарового тракта. По условиям температурного режима металла поверхностей нагрева ее следует стабилизировать по всей длине пароперегревательного тракта. В связи с этим регулирование температуры перегрева пара считается сложной задачей. Объект управления представляет собой сложную динамическую систему, подверженную воздействию внутренних и внешних возмущений. Температуру на выходе каждого участка стабилизируют с помощью автономных автоматических регуляторов, воздействующих на впрыскивающие устройства. Для обеспечения оптимальной работы этих регуляторов необходим анализ данных о работе системы в различных условиях и при различных нагрузках [1].

Минимизация линейного интегрального показателя качества регулирования является наиболее простым решением при оптимизации настроечных параметров. В работе осуществляется расчет АСР температуры перегретого пара прямооточного котла на различные критерии качества регулирования. Эти критерии должны обеспечить минимум линейного, квадратичного, модульного интегральных показателей, минимум дисперсии процесса регулирования [2].

В работе проводится определение настроечных параметров при работе АСР температуры перегретого пара в условиях детерминированных и случайных возмущений, а также с учетом различных режимов работы энергоблока (75 %, 100 %). Рассчитаны и проанализированы процессы регулирования для изменяющихся критериев качества и вариации динамики объекта управления.

Проведенные расчеты могут быть рекомендованы при оптимизации различных АСР в зависимости от предъявляемых требований к качеству процессов регулирования.

Литература

1. **Плетнев Г.П.** Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций: Учебник для вузов. М.: Издательство МЭИ, 1995. 372 с.
2. **Андрюшин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 392 с.

*В.В. Гурьянова, К.Д. Крупенченко, студенты;
рук-ли С.В. Мезин, к.т.н., доц.; Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ SPPA-T3000

Одной из наиболее важных задач, решаемых в области АСУ ТП, является выбор алгоритма регулирования теплоэнергетического объекта. Алгоритмы разрабатываются на основе математической модели объекта и закладываются в контроллеры, которые входят в состав программно-технического комплекса (ПТК). Выбор ПТК SPPA-T3000 для решения задач управления обусловлен высокой эффективностью его работы и простотой эксплуатации, что позволяет с его помощью внедрять новые, экономически выгодные решения в области автоматизации.

В данной работе авторами предложено реализовать посредством использования SPPA-T3000 одноконтурную автоматическую систему регулирования (АСР) с ПИД-регулятором и алгоритм максимального быстрого действия и рассмотреть их действие на примере регулирования температуры объекта [1], [2].

Первоначально для разработки предложенных алгоритмов регулирования используется математическая модель объекта, параметры которой взяты на производстве. После отладки работы контроллера на виртуальном объекте к нему подключаются исполнительный механизм, регулирующий орган и объект, имитирующий поведение реального объекта теплоэнергетики. В качестве объекта регулирования рассматривается температура в электропечи.

В результате для каждого алгоритма были получены переходные процессы, после чего было произведено их сравнение и выбор наилучшего из них для управления выбранным объектом.

Впоследствии данная разработка может быть использована в следующих направлениях:

- 1) в качестве цикла лабораторных работ для освоения ПТК SPPA-T3000;
- 2) для сравнения классической и современной теории управления объектами малой и большой энергетики.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Пикина Г.А.** Оптимизация и оптимальное управление. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. **Рогач В.Я.** Теория автоматического управления. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2004.

В.В. Гурьянова, студ.; рук. В.М. Парчевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХМЕРНЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Одной из важнейших проблем, стоящих перед атомной энергетикой, является повышение маневренности АЭС. Использование двухмерных сепарационных характеристик (ДСХ) [1] парогенераторов (ПГ), облегчает эту задачу. Кроме того, появляется возможность оптимизировать работу энергоблока, повысить его экономическую эффективность и безопасность. Для грамотного управления объектом нужно располагать критерием оптимальности (целевой функцией). В данной работе он выражен в денежном эквиваленте как сумма двух составляющих:

$$L = L1 + L2, \quad (1)$$

где $L1$ — ущерб от повышения влажности пара; $L2$ — ущерб, связанный с запасом воды в парогенераторах.

Для турбоагрегата К-1000-60-1500 ущерб, связанный с влажностью пара, можно рассчитать по формуле

$$L1 = K1\omega (h_1, \dots, h_4, d_1, \dots, d_4), \quad (2)$$

где ω — влажность пара, поступающего на турбину, %; h_1, \dots, h_4 — массовые уровни в каждом из четырех ПГ, мм; d_1, \dots, d_4 — относительная паровая нагрузка каждого из ПГ; $K1 = 7000 \cdot C$, руб/(ч·%) — коэффициент перевода влажности в денежный эквивалент; C — себестоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч).

$$L2 = \sum_{i=1}^n (P_i l_i - \Delta l_i(h_i, d_i)), \quad (3)$$

где n — количество аварийных событий, последствия которых связаны с запасом воды в ПГ; P_i — вероятность наступления аварийного события; l_i — ущерб от i -го аварийного события; Δl_i — снижение ущерба от аварии в результате использования запаса воды в парогенераторах.

С помощью процедуры статической оптимизации находятся значения уровней в каждом из ПГ, минимизирующие критерий (1) с учетом ограничений.

Литература

1. Парчевский В.М., Гурьянова В.В. Моделирование сепарационной характеристики парогенератора атомной электрической станции// Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28: сб. трудов в 12 т. Саратов, 2015. Т.6. С. 143—145.

В.С. Дробилко, студ.; рук. В.П. Зверьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В SPPA-T3000

Работа посвящена рассмотрению вопросов проектирования одноконтурной АСР с использованием средств, предоставляемых системой автоматизированного проектирования программно-технического комплекса SPPA-T3000.

Система управления и контроля SPPA-T3000 — программно-технический комплекс, разработанный компанией Siemens, является системой управления производственными процессами, создающей уникальную открытую платформу для внедрения современных, ориентированных на будущее решений в области автоматизации производственных предприятий [1]. Система обеспечивает возможности проектирования, разработки, эксплуатации и обслуживания автоматизированных систем управления технологическими процессами предприятия. Технологическое программирование алгоритмов управления осуществляется на базе модулей библиотеки SPPA-T3000. Библиотека содержит программные модули, используемые для реализации информационных и управляющих функций автоматизации и управления.

В данной работе разрабатывается одноконтурная система регулирования — наиболее распространенная в использовании. Система относительно несложная в реализации, обеспечивающая достаточно высокую точность регулирования. При проектировании системы используется модуль библиотеки «блок управления регулирующим органом с функцией ПИ-регулятора» - SERVO. Данный блок генерирует положительный импульс на выходе команды C_OPEN и отрицательный на выходе команды C_CLOSE, причем длительность данных импульсов зависит от рассогласования и величины зоны нечувствительности.

В работе рассматривается возможность реализации модели регулирующего органа в виде интегрирующего звена с различными значениями времени перемещения исполнительного механизма T_m (0 – 100%). Изменяя и усложняя эту модель, можно исследовать влияние различных факторов, например наличие люфтов и других нелинейностей, на качество регулирования.

В докладе приводится описание лабораторной работы, которая поможет студентам лучше ориентироваться в ПТК SPPA-T3000, а также закрепить свои знания в теории автоматического управления.

Литература

1. **Зверьков, В. П., Мезин С.В.** Подготовка и реализация проектов АСУТП на базе ПТК SPPA-T3000 фирмы "Сименс". М. : Издательский дом МЭИ, 2012.

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПИТАНИЯ КОТЛА В СРЕДЕ MATLAB

Для поддержания корректной и бесперебойной работы котла, необходимо построить математическую модель объекта регулирования, которая позволит не только понять свойства и структуру объекта, но и научиться управлять процессом и прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации.

Целью реализации описания математической модели питания котла в среде Matlab является проверка заданной системы управления на робастность, так как это позволит повысить надежность эксплуатации.

Одним из основных параметров питания котла является расход питательной воды. К примеру, расходом питательной воды регулируют уровень в барабанном котле. Превышение уровня установленного предела приводит к останову котла. Построив АСР питания в среде Matlab и зная динамические характеристики котла при возмущениях, можно узнать математическую модель объекта, составив систему уравнений [1]. Затем через вспомогательную функцию можно определить оптимальные настройки регуляторов. Найдя оптимальные параметры регуляторов, необходимо проверить на возможность реального функционирования при отсутствии заметных возмущений [2]. Мы должны помнить, что в реальном мире каждый объект находится под воздействием мелких случайных возмущений. И от любого случайного возмущения неустойчивая система начнет колебаться с нарастающей амплитудой. Эти исследования были проведены в программах Matlab и Mathcad. Сравнивая две среды Matlab и Mathcad, можно с уверенностью сказать, что изучение поведения модели в программе Matlab наглядней, точнее и проще.

Изменяя параметры объекта по разным каналам в АСР, построенной в среде Matlab с помощью основной библиотеки Simulink, можно наблюдать, как будет изменяться переходный процесс на выходе системы

При моделировании системы нужно всегда обращать внимание на робастность системы и предусматривать малые вариации параметров относительно заданных значений для сохранения заданного запаса устойчивости.

Литература

1. **Плетнев Г. П.** Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 1995. 352 с., ил.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Организация поддержания технологического режима котлоагрегата на номинальном значении является актуальной задачей, решение которой позволяет снизить удельный расход топлива на выработку электрической и тепловой энергии на ТЭЦ.

В данной работе эта задача решается в режиме советчика на основе расчета оперативных ТЭП агрегатов.

Программа вставлена в программное обеспечение АСУ ТП. Процедура анализа и оптимизации режимов функционирует в реальном масштабе времени. Она позволяет отображать режимную карту на мониторе оператора, производить сравнение текущих параметров с номинальными значениями и оперативно производить сообщения оператору при отклонении режима от номинального, например, КПД, а также выдавать рекомендации по корректировке режима.

Для формирования или уточнения оптимальных режимов ведения процесса была использована подпрограмма обработки данных на основе пассивного эксперимента. Эта программа просматривает информацию на сервере, выбирает интервалы постоянного режима и сортирует их по выбранному критерию. По указанной программе был проведен анализ работы котлов за последние два года по критерию наивысшего КПД.

Из анализа можно заключить следующее:

разброс КПД составляет 1,5—3 % на разных котлах, а его среднее значение лежит выше указанного в режимной карте на 1 %.

Уточнение номинальных режимов заключается в поиске стационарных режимов агрегатов на заданном отрезке времени и ранжировании найденных режимов по значению КПД. В результате поиска для каждого отрезка тепловой нагрузки строится ряд стационарных режимов по найденным средним значениям КПД. Предоставляется возможность просмотра полной формы режимной карты для каждого стационарного режима.

Задача заключается в периодическом статистическом анализе работы котлоагрегата, расчете новых номинальных значений оперативных ТЭП и замене старых на вновь рассчитанные.

Анализ проводится раз в месяц. При этом осуществляется сравнение параметров режимной карты за последний месяц с предыдущими данными. Процедура анализа запускается автоматически и выполняется в фоновом режиме.

Н.А. Ермилов, студ.; В.П. Зверьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ НА МИНИМУМ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА

Автоматическое управление непрерывными технологическими процессами в энергетике осуществляется на базе современных микропроцессорных контроллеров, позволяющих реализовать достаточно сложные законы управления, одним из которых является ПИД-закон регулирования. Актуальной проблемой является определение оптимальных, в определенном смысле, значений параметров настройки регулятора [1].

Применение ЭВМ позволяет использовать интегральные критерии, существенно отличающихся по виду подынтегральных функций.

В работе рассматривается поиск интегральных критериев, минимум которых в пространстве параметров регулятора при заданном запасе устойчивости настраиваемой системы регулирования дает наилучшие результаты. Рассматривалась одноконтурная система с ПИД-регулятором при ограничении на запас устойчивости $M=1,62$.

Значения критериев определялись с помощью программы Mathcad с использованием поискового метода деформируемого многогранника. Сравнение получаемых в результате оптимизации переходных характеристик системы регулирования, производилось с использованием следующих показателей:

- максимальное динамическое отклонение ошибки регулирования ε_{\max} ;
- модуль амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по каналу задания;
- площадь получаемых оптимальных переходных процессов при возмущении по каналу регулирующего воздействия.

Были рассмотрены 8 критериев качества. Полученные результаты сведены в таблицу, приводимую в докладе.

Проведенное исследование позволяет рекомендовать интегральный критерий модуля ошибки на время как наиболее эффективный для прямого поиска оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора, обеспечивающих выполнение требований по устойчивости и качеству процессов регулирования.

Литература

1. Рогач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Энергия, 1973.

Ю.Н. Звонарёва, асп.; рук. Ю.В. Ваньков, д.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОСНАЖЕНИЯ

Современные системы теплоснабжения являются сложными техническими объектами, при управлении которыми приходится решать вопросы обеспечения потребителей требуемыми параметрами теплоносителя, связанные с установлением заданных давлений, распределением потоков и т.п.

Решение более сложных задач, таких как прогнозирование поведения многокольцевой системы теплоснабжения города при различных внешних условиях, требует внедрения программного инструмента.

Для выработки комплексного понимания взаимосвязи между всеми элементами системы и принятия наиболее энергоэффективного решения необходима экспериментальная база с возможностью моделирования режимов работы систем теплоснабжения на лабораторных стендах.

Стенды позволяют проводить оценку адекватности теоретических моделей управления режимами работы инженерных систем без риска нанесения ущерба реальным объектам в случае проведения натурных исследований.

Ранее нами были опубликованы результаты проведенных исследований, и на их основании дана оценка влиянию поэтапного внедрения автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов с погодозависимым регулированием (АИТП) на абонентов с элеваторной схемой смешения [1, 2].

С помощью лабораторно-измерительного комплекса, установленного на базе нашего университета, были смоделированы режимы работы внутрисетевой системы теплоснабжения с учетом изменения параметров теплоносителя на входе в тепловой узел при постепенном переходе потребителей от центральных к индивидуальным тепловым пунктам.

Полученные результаты исследований направлены на увеличение эффекта от энергосберегающих мероприятий и на оптимизацию работы системы теплоснабжения, действующей в границе крупного района города.

Литература

1. **Звонарёва Ю.Н., Ваньков Ю.В., Назарычев С.А.** Оценка экономического эффекта для потребителей при установке автоматизированных узлов учета и регулирования тепловой энергии // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4.
2. **Звонарёва Ю.Н., Ваньков Ю.В., Назарычев С.А.** Моделирование режимов работы тепловых сетей с целью эффективного использования тепловой энергии // XVI Межд.симп. Казань: Изд.: ИП Шайхутдинова А.И., 2016.

*И.Ю. Казьмирук, Я.В. Калинина, А.И. Румянцев, студенты;
рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ОБОЛОЧКЕ АСОПЗ

Стратегической целью социальной политики РФ в энергетике в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 года является воспроизводство человеческого капитала ТЭК. Реализация этой цели предполагает, в том числе, комплексное совершенствование системы отраслевого образования в соответствии с современными требованиями [1].

Одним из значимых направлений развития системы образования является расширение системы дистанционного обучения, в частности, создание электронных учебников, а также разработка и апробация программных сред для написания электронных учебных пособий.

Авторами были разработаны электронные учебные пособия по всему спектру деятельности специалистов электростанций, начиная с техники безопасности, заканчивая выборочным основным оборудованием станций (котельное оборудование, турбины, генераторы). В качестве инструмента для создания пособий была выбрана программная среда АСОПЗ (автоматизированная система обучения и проверки знаний), разработанная и апробированная на каф. АСУ ТП НИУ «МЭИ».

В ее возможности входит разграничение прав доступа администратора и обучающегося, настройка экзаменационного процесса, выбор материалов для обучения в привязке к профилю специальности слушателя и проч.

В ходе работы были протестированы эти и другие возможности оболочки АСОПЗ для разработки электронных учебных пособий, а именно:

- осуществлено иерархическое структурирование учебных материалов, эргономическое обеспечение учебного материала;
- скомплектованы тестовые вопросы разного уровня сложности для обеспечения входного и выходного контроля обучающегося;
- сформированы предметные указатели и указатели терминов;
- распределен иллюстративный материал, графики и таблицы различного формата.

Разработанный комплекс учебного материала может быть успешно применен для повышения квалификации и определения уровня знаний персонала электростанций.

Литература

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 года, утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р.

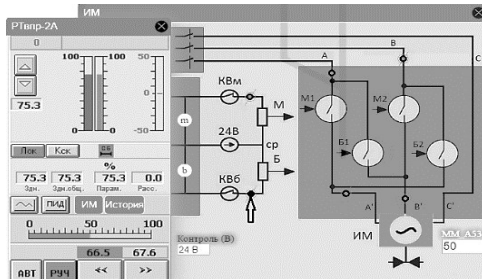
Е.А. Кишкин, Л.Е. Вендланд, студенты;
рук. В.Ф. Кузищин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ НАРУШЕНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Разрабатывается компьютерная программа для имитации нарушений в технических средствах автоматических систем регулирования (АСР) ТЭС на базе разработок Учебно-тренировочного пункта кафедры АСУТП МЭИ [1]. Основной целью является повышение уровня профессионализма персонала цехов ТАИ и АСУТП электростанций при нормальной эксплуатации оборудования и обнаружении возможных нарушений, а также для проведения соревнования оперативного персонала. В программе моделируются нарушения в работе и обрывы цепи в схемах исполнительных механизмов для участков впрыска конденсата АСР температуры перегретого пара, а также подачи питательной воды АСР уровня в барабане котла-утилизатора.

Компьютерный тренажер имитации нарушений предусматривает окно выбора варианта, для которого случайным образом вводится неисправность, а персоналу требуется выявить его вид из возможных вариантов. Для выявления неисправности предусмотрено окно тренда контролируемых переменных, а также окно мультиметра, в котором выводится значение переменной в контрольной точке. Пример взаимодействия с программой представлен на рисунке. В случае, если в цепи произошел обрыв, показание мультиметра не будет соответствовать требуемому значению.

Программа разработана с применением языков программирования JavaScript и Html. Это позволяет инструктору дистанционно задавать варианты неисправностей, варианты контроля теоретических знаний персонала, а также просмотреть результаты обучения и поиска неисправностей.



Литература

1. Применение "Комплекса компьютерных средств подготовки персонала цехов ТАИ ТЭС" в соревнованиях профессионального мастерства / В.В. Охотин, Н.Д.Кузнецов, В.Ф. Кузищин и др. // Электрические станции. 2001. № 2. С. 41—46.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСУ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Практически любой сложный объект автоматизации представляет собой единую взаимосвязанную структуру, состоящую из отдельных технологических процессов, которые пространственно распределены. В ходе разработки систем управления такими объектами возникает потребность имитационного моделирования, обеспечивающего отработку алгоритмических, информационных, программных и технических ресурсов АСУ ТП [1].

Решением задачи динамического моделирования нестационарных процессов в АСУ распределенными теплоэнергетическими объектами является модель, представляющая собой взаимосвязанную структуру сосредоточенных моделей – ячеек. Математическая модель ячейки представляет собой систему уравнений, включающие алгебраические, дифференциальные или интегральные уравнения, описывающие физико-химические законы процессов в объекте. Принципиально важным является учет в коэффициентах уравнений текущих значений теплофизических параметров процесса (расходов, температур, давлений и т.п.).

Данное решение, в отличие от сосредоточенной линейной динамических модели, соответствует новому классу задач управления теплоэнергетическими многосвязными, многомерными, с распределенными параметрами объектами, и учитывает следующие функциональные характеристики: нелинейный, нестационарный, динамический характер технологических процессов, их тесную взаимосвязь, а также зависимость динамических свойств и состояний от пространственных координат. В результате удастся обеспечить эффективное управление процессами с минимальными тепловыми потерями.

В работе рассмотрен физический пример задачи моделирования процессов теплообмена в замкнутом помещении, ограниченном стенами, допускающими естественный или искусственный обмен потоками воздуха и теплоты.

Литература

1. Колосова Ю.С., Кондрашин А.В. О применении метода конечных элементов к задаче динамического моделирования процессов в распределенных теплоэнергетических объектах управления// Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, «Энергия-2016». Иваново: ИГЭУ, 2016. В 6 т. Т. 1. С. 88—90.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС НА БАЗЕ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время энергетические характеристики (далее ЭХ) паротурбинного оборудования как один из индикаторов эффективности использования энергоресурсов агрегатом при условии отсутствия упущений в его эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте, проходят свою актуализацию не реже, чем раз в 5 лет. За этот промежуток времени происходят различные изменения, как с оборудованием (моральное старение), так и с технологией ведения режима работы ТЭС. Для пересмотра нормативно-технической документации, в состав которых входят ЭХ ТЭС, заключают договоры на оказание услуг по их обновлению, при этом стоимость таких услуг очень высока.

На основе изложенного выше предлагается разработать модель, алгоритм и программное обеспечение для периодической и автоматической актуализации ЭХ оборудования станции.

В основе модели по решению проблемы, описанной выше, лежит программный продукт с помощью которого, проведя определенные стадии алгоритма, на выходе будем иметь энергетические характеристики паротурбинного оборудования, применение которых в дальнейшем позволит повысить энергоэффективность производства электрической и тепловой энергии на ТЭЦ.

К основным этапам алгоритма по определению ЭХ оборудования ТЭС можно отнести следующие:

- сбор исходных данных необходимых для адекватной работы модели;
- анализ полученных исходных данных;
- использование разработанного программного комплекса;
- анализ полученных энергетических характеристик.

Программный продукт может использоваться для всего модельного ряда паротурбинных установок ТЭС различного назначения. Его использование в конечном итоге позволит улучшить качество расчетов и планирования работы оборудования, что в свою очередь позволит сократить топливную составляющую в общей себестоимости продукции, а также исключить дорогостоящие режимные испытания специализированными организациями.

К.Д. Крупенченко, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ СТЕПЕНИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ БОЛЕЕ ПРОСТЫМ ПАРАМЕТРОМ

В современном обществе тема экологии окружающей среды обстоит очень остро и является актуальной для теплоэнергетической отрасли. Ведется постоянный мониторинг и контроль выбросов на теплоэнергетических объектах, сжигающих органическое топливо. Поэтому газовая рециркуляция (ГР) на станциях используется для технологических воздействий на оборудование для его нормальной работы в качестве атмосфероохранного мероприятия [1].

Для управления выбросами ГР необходимо соответствующим образом регулировать. Автоматическое регулирование параметра невозможно без его непрерывного автоматического измерения с достаточной точностью. Отсутствие простого и достаточно точного метода измерения степени рециркуляции вынуждает использовать неадекватные заменители этого параметра, например указатель положения на направляющих аппаратах ДРГ, но такая замена не является оптимальной и эффективной с точки зрения методики определения данного параметра.

В данной работе предлагается простой метод определения степени рециркуляции, основанный на измерении перепада давления дымовых газов на поверхностях нагрева.

В результате для всех видов поверхностей были получены зависимости коэффициента K от степени рециркуляции и паровой нагрузки котла $K(r, D)$, после чего было произведено их сравнение и выбор наилучшего из них для управления выбранным объектом, а также проанализированы все сильные и слабые стороны данного метода.

Впоследствии данная разработка может быть использована в следующих направлениях:

- 1) для получения формулы, заменяющей степень рециркуляции с достаточной точностью на котлах с трубчатыми воздухоподогревателями;
- 2) для получения удобного алгоритма управления и реализации его на ПТК после внедрения в объекты малой и большой энергетики;
- 3) для упрощения регулирования выбросами оксидов азота в окружающую среду.

Литература

1. **Мейкляр М. В.** Современные котельные агрегаты ТКЗ. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978.

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОЙ ВОДООЧИСТКИ

Для питания паровых котлов современных паровых станций подходит вода, в которой практически отсутствуют все примеси, находящиеся в обрабатываемой воде, как в растворенном, так и в коллоидном и грубо дисперсном состояниях. Преследуя эту цель, исходная вода из реки Днепр в химическом цехе проходит обработку на водоподготовительной установке для получения умягченной и обессоленной воды [1].

На Смоленской ТЭЦ-2 для получения умягченной воды предусмотрена следующая схема очистки исходной воды: предочистка → механические фильтры → Na-катионирование, далее умягченная вода направляется в баки химически очищенной воды, а затем в котлотурбинный цех для подогрева и дальнейшего поступления на подпитку теплосети.

Для питания котлов предусмотрено двухступенчатое обессоливание исходной воды по схеме: предочистка → механические фильтры → H-катионирование первой ступени → анионирование первой ступени → декарбонизация → H-катионирование второй ступени → анионирование второй ступени, и далее обессоленная вода направляется в баки обессоленной воды, а затем в котлотурбинный цех на подпитку паровых котлов.

Применение микропроцессорной системы управления в элементах предочистки, таких как осветлители и баки известково-коагулированной воды, позволит наиболее точно отслеживать уровни воды в баках, определять нужную дозировку реагентов, для обеспечения эффективной очистки воды и контроля расход очищенной воды после элементов предочистки.

Предлагаемая установка электроконтактных манометров, датчиков давления и температуры, датчиков выноса фильтрующего материала и промывки, датчиков световой и звуковой сигнализации, с выходным логическим сигналом, на таких элементах водоподготовительной установки как: механические фильтры, Na-катионитовые фильтры, обе ступени H-катионирования и анионирования, позволит обеспечить повышенную надежность очистки воды, предотвратить нештатные ситуации, связанные с преждевременным выходом из строя используемого оборудования. Что впоследствии позволит значительно уменьшить затраты на капитальный ремонт используемого оборудования.

Литература

1. **Справочник** химика-энергетика. Т.1. Водоподготовка и водный режим парогенераторов/ под ред. С.М. Гурвич. — Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1995. 456 с.: ил.

О ВЫБОРЕ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ И ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ СГЛАЖИВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ АСР С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ УНИВЕРСАЛЬНЫМ БЕСПОИСКОВЫМ МЕТОДОМ

В данной работе рассматривается одноконтурная АСР с ПИ-регулятором и физической моделью объекта управления (ОУ), рассчитанная с помощью универсального беспоискового метода (УБМ) [1], рассматриваются вопросы выбора диапазона частот приближения и постоянной времени сглаживания T_c . Передаточная функция ОУ была получена в результате аппроксимации экспериментально полученной кривой разгона:

$$W_{об}(s) = \frac{1,04e^{-3s}}{(207,9s + 1)(39,5s + 1)}.$$

При расчете ПИ – регулятора по УБМ необходимо задаться диапазоном частот приближения и T_c . Согласно [1], были выбраны: диапазон частот $\omega \in [0,001—0,542]$, охватывающий три квадранта годографа КЧХ ОУ и $T_c = 8\tau = 24$ с. Соответственно получены параметры настройки: $K_p = 4,653\% \text{УП}/^\circ\text{С}$, $T_u = 222,494$ с, расчетный и экспериментальный переходные процессы для данного случая приведены на рис. 1.

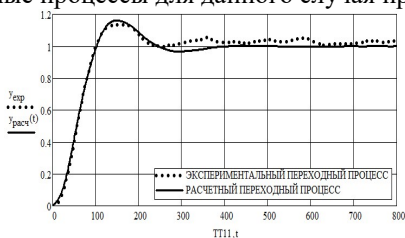


Рис. 1

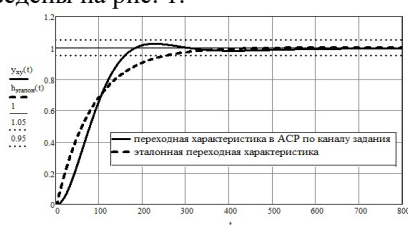


Рис. 2

Согласно расчетам, диапазон частот приближения может быть без существенной потери качества сужен до $[0,00011; 0,011]$; для получения апериодического переходного процесса T_c необходимо увеличить как минимум до $T_c = 27\tau = 81$ с, при этом процесс оказывается достаточно близким к эталонному, приведенному в [1] (см. рис. 2).

Полученные результаты можно в будущем использовать для уточнения рекомендаций по выбору диапазона частот и постоянной времени сглаживания.

Литература

1. Бурцева Ю.С., Пикина Г.А. Универсальный метод настройки линейных регуляторов: методическое пособие. М.: Издательство МЭИ, 2016. 32 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЫХОДА ПАРА С ЗЕРКАЛА ИСПАРЕНИЯ ПГ АЭС С ВВЭР 1000

Для управления уровнем h в парогенераторе (ПГ) обычно используют его одномерную сепарационную характеристику $\omega(h)$ [1], справедливую только для одного значения паровой нагрузки d (обычно номинальной), не пригодной для управления при любой нагрузке, что необходимо при работе АЭС в режиме регулирования частоты и мощности. Альтернативой является построение двухмерной сепарационной характеристики (ДСХ) $\omega(h, d)$, в которой влажность насыщенного пара зависит от уровня и паровой нагрузки ПГ.

Для получения ДСХ необходимо располагать моделью зависимости скорости выхода пара (w) с зеркала испарения от номера зоны ПГ i (рис. 1) и нагрузки d , что является предметом данного доклада. Модель представлена в виде эмпирической формулы:

$$w_i = a_i + b_i d,$$

где $a_i = a_1 + a_2 d$, $b_i = b_1 + b_2 d$, a_1, a_2, b_1, b_2 — постоянные коэффициенты, соответствующие i -й зоне в ПГ.

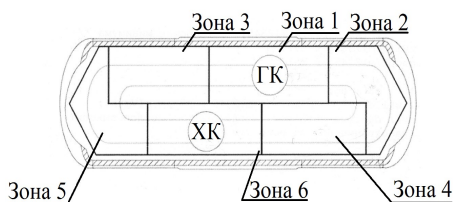


Рис. 1. Схема разбиения зеркала испарения ПГ на зоны

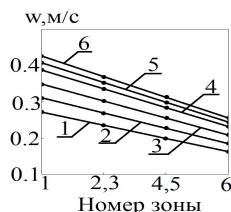


Рис. 2. Распределение скоростей выхода пара с зеркала испарения по зонам при различных нагрузках

ДСХ может быть использована при работе в реальном масштабе времени для реализации различных сценариев управления влажностью при работе АЭС в режиме регулирования частоты и мощности в энергосистеме; для разработки программного обеспечения тренажеров; в учебных целях.

Литература

1. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2001.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКИ КОТЛОАГРЕГАТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ОБЩУЮ ПАРОВУЮ МАГИСТРАЛЬ

Одной из важнейших задач при эксплуатации котельных агрегатов является поддержание его параметров с заданной статической и динамической точностью.

Для регулирования тепловой нагрузки котлоагрегата обычно применяется двухимпульсная система регулирования с общей точкой по давлению в главной паровой магистрали, с ПИ-регулятором в основном контуре регулирования. При параллельной работе котлов данная система регулирования приводит к существенной неравномерности поддержания давления по длине в главном паропроводе, а также к большой динамической ошибке регулирования.

В данной работе предлагается трехимпульсная система регулирования тепловой нагрузки с П-регулятором по основной регулируемой величине давлению в барабане. П-закон регулирования реализуется с помощью ПИ-регулятора, охваченного жесткой обратной связью по расходу газа. Для устранения статической ошибки у П-регулятора вводится дополнительный контур по основному возмущению-расходу перегретого пара. Такая система регулирования строится для каждого котлоагрегата. Данная система позволила обеспечить номинальное поддержание давления по всей магистрали и улучшить динамические характеристики всей системы регулирования.

Было проанализировано влияние двух и более последовательно включенных котлов на давление в трубопроводе. Анализ проводился в пакете Vissim для систем регулирования, взаимосвязанных между собой по основной регулируемой величине.

Из наблюдаемых переходных процессов было видно, что они имеют повышенную колебательность. Для ее устранения потребовалась коррекция параметров настройки П-регулятора котлов.

Существенно качество динамического процесса зависит от количества котлов, работающих в регулирующем режиме. Анализ производился для работы одного, двух и трех котлов. Он показал, что с увеличением количества котлов, включенных в систему регулирования, по сравнению с предыдущей схемой динамические характеристики ухудшаются.

В этом случае при каждом подключении котла в регулирующий режим возникает необходимость динамической подстройки параметров регуляторов.

*А.А. Образцов, Д.Ю. Быстрова, А.А. Шилов, студенты;
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ (СВБУ) АСУ ТП АЭС

Выход на международный рынок атомной промышленности России вскрыл ряд проблем, связанных с российскими системами АСУ ТП. Системы строились на основе традиционных средств автоматики с жесткой логикой и практически не применялись программируемые контроллеры. Кроме этого, средства контроля и управления БПУ создавались на основе архаичных средств — стрелочные приборы, самописцы, световые индикаторы и т.п. Что, как следствие, затрудняло модернизацию, системную интеграцию. АСУ ТП АЭС занимали огромные помещения, требовали большого количества эксплуатационного и ремонтного персонала.

Не были также реализованы интеллектуальные алгоритмы контроля, управления и диагностики, повышающие безопасность АЭС, наличие которых является обязательным в соответствии с требованиями МАГАТЭ.

Система верхнего блочного уровня является подсистемой АСУ ТП и предназначена для централизованного контроля и представления информации по энергоблоку, а также управления механизмами систем нормальной эксплуатации (СНЭ) и оборудованием, совмещающим функции нормальной эксплуатации и безопасности [1].

Система верхнего блочного уровня позволяет непрерывно получать информацию о состоянии станции, его изменении и показателях, важных для безопасности и работоспособности систем, а также анализировать поступающие данные для обеспечения нормальной эксплуатации АЭС.

В работе рассмотрены современные методы построения информационно-управляющих систем верхнего уровня и проблемы, возникающие при ее создании.

Литература

1. **Комплекс работ по созданию первой управляющей системы верхнего блочного уровня АСУ ТП для «Бушер» на основе отечественных информационных технологий / Н.Э. Менгазетдинов, М.Е. Бывайков, М.А. Зуенков и др. М.: ИПУ РАН, 2013.**

А.А. Образцов, студ.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОЛУЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СХЕМАХ ТЭС И АЭС

Одной из важнейших задач на электростанции является оптимизация режимов работы и снижение затрат на выработку электроэнергии и тепла.

Коррекция измеряемых параметров для расчета технико-экономических показателей осуществляется до выполнения материальных энергетических балансов станции и позволяет:

- Повысить оперативность в точности расчетов ТЭП;
- Рассчитать и спрогнозировать потери и расходы на собственные нужды;
- Автоматизировать контроль над эффективностью режимов работы оборудования;
- Прогнозировать время вывода оборудования на техническое обслуживание и ремонт;
- Получить объективную оценку эффективности работы оперативного персонала;
- Оперативное выявление неисправности измерительных каналов АСУ ТП;
- Вычислять оценки неизмеряемых внутрисхемных технологических параметров и нормативных характеристик энергозатрат насосов, дымососов, дутьевых вентиляторов [1].

Были получены результаты для ТЭЦ МЭИ. В таблице приведены результаты прямых измерений и расчеты, полученные с помощью алгоритма, базирующегося на уравнениях материальных и тепловых балансов

	0	1
0	25.99283	23.71354
1	15.47011	12.61979
2	8.02501	8.92932
3	6	5.59385
4	0.17613	1.95629·10 ⁻¹³
5	22077.69704	17985.48612
6	14327.57389	18532.30753
7	0.03	0.00532

ТУРБИНА =

0. тепло с острым паром
1. тепло с отборным паром
2. тепло с конденсатом
3. электроэнергия
4. небаланс по энергии
5. расход отборного пара
6. расход конденсата
7. давление конденсата на выходе турбины

Литература

1. Математическое и программное обеспечение алгоритма коррекции измеряемых параметров для расчета технико-экономических показателей на ТЭЦ / В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин и др. // Вестник МЭИ. 2003. № 1. С. 21—27.

Е.В. Плавская, студ.; рук. А.Н. Черняев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДИФИКАЦИЯ И АКТУАЛИЗАЦИЯ 3D АНАЛИЗА

Принципы разнообразия и «защиты в глубину» — одни из самых важных принципов, обеспечивающих безопасность АЭС.

Разнообразие — принцип проектирования, который заключается в использовании различных технологий, различных схем и алгоритмов или различных исполнительных устройств с целью обеспечить возможность обнаружения отказа и отреагировать на него разными способами. Суть принципа глубоко эшелонированной защиты основана на применении системы физических барьеров, кроме этого, подсистемы АСУ ТП должны формировать несколько уровней защиты. Применение принципа разнообразия и глубоко эшелонированной защиты обеспечивает защиту от отказов по общей причине. Отказ по общей причине — отказ двух или более конструкций, систем и элементов АСУ ТП, вследствие конкретного события или конкретной единичной причины. Отказ системы защиты реактора может повлечь за собой угрозу жизни и здоровью персонала и населения. Поэтому необходимо проверять достаточность применения принципов во избежание отказов по общей причине.

Цель 3D анализа — определить наличие достаточного разнообразия и глубоко эшелонированной защиты систем защиты реактора для компенсации отказа по общей причине.

Нормативный документ NUREG/CR-6303, вступивший в силу в 1994 году — единственный стандарт, отражающий суть и алгоритм проведения анализа [1]. Но на сегодняшний день информация, которой располагает NUREG/CR-6303, устарела. Исходя из этого, предлагается проведение анализа, в котором будет отражена современная система защиты реактора и использованы современные алгоритмы, реализующие защиты.

Литература

1. **NUREG/CR-6303** Method for Performing Diversity and Defense-in-Depth Analyses of Reactor Protection Systems, 1994.

Е.В. Повальнова, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА МАКСИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ТИПА МЭО

Алгоритм максимального быстродействия (МБ) обеспечивает не только минимальное время переходного процесса, но и, по мнению многих исследователей, минимальную дисперсию [1]. Однако в тепловой и атомной энергетике этот алгоритм не нашел применения. Основная причина связана с тем, что электрические исполнительные механизмы типа МЭО не допускают частых срабатываний, увеличение же шага дискретности заметно снижает качество регулирования максимального быстродействия.

В работе выполнен синтез и исследование МБ-алгоритма для типовых моделей котла [2]

$$\sigma = y - T_1 y' + \text{sign}(y') \frac{KT_1}{2} \ln \left(1 + \text{sign}(y') \frac{2y'}{K} \right);$$

$$u^*(t) = -\text{sign}(\sigma);$$

$$u^*(t) = 0, \text{ если } |y| \leq \varepsilon_1; |y'| \leq \varepsilon_2,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — параметры зоны нечувствительности регулятора.

Проведено изучение влияния шага дискретности по времени на качество регулирования систем с объектами различной инерционности. Показано, что в случае объекта с малой инерционностью ухудшение качества становится недопустимо заметным.

Предложены и апробированы два способа нейтрализации негативного влияния шага дискретности: способ прогнозирования регулируемой величины на шаг дискретности и поворот линии переключения навстречу движения фазовой точки. Доказано, что оба способа достаточно эффективны даже при больших шагах дискретизации по времени, что позволяет считать паспортное ограничение на количество включений электродвигателя некритичным.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Пикина Г.А.** Оптимизация и оптимальное управление: Учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 408 с.

2. **Давыдов Н.И., Григоренко А.А.** Локальный тренажер на базе ПТК КВИНТ для задачи регулирования теплофикационного энергоблока с турбиной ПТ-80 // Труды международной научной конференции Control-2003 «Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП». 2003. С. 61—70.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГТУ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Математическое моделирование объектов является одной из наиболее частых задач при разработке новых энергетических агрегатов или изучении существующих [1]. При всем многообразии объектов моделирования для получения зависимостей в основном используется метод наименьших квадратов (МНК).

Однако он не универсален. Поскольку в этом методе используются частные производные по параметрам, то на аппроксимируемую функцию накладывается ограничение дифференцируемости хотя бы в рабочей области. Следовательно, поднимается вопрос разработки методики для аппроксимации функций, которые могут быть недифференцируемыми или могут иметь сложные для описания математические зависимости.

В качестве одного из вариантов предлагается использовать нейронную сеть с одним скрытым слоем (перцептрон) в качестве средства аппроксимации зависимостей, полученных экспериментально. Обучение нейросети будет производиться методом обратного распространения ошибки (backpropagation/градиентный спуск) путем представления на входе одного или нескольких независимых параметров (напр. мощность ГТУ) и расчета ошибки и корректировки весов в соответствии с разницей полученного и экспериментального значения аппроксимируемой функции (например, КПД установки, температуры за турбиной и проч.) [2].

Для реализации методики автором разрабатывается библиотека на языке Python. Обработка данных и представление полученных результатов производится в среде Jupyter notebook (ядро IPython).

Дальнейшее развитие нейросетей в этой области и переход от перцептрона к нейросетям с памятью (рекуррентные сети, LSTM сети и другие) или более сложным архитектурам (сверточные сети) предполагает лучшую точность аппроксимации, возможность описывать динамические процессы объектов и увеличить скорость обучения.

Литература

1. **Андрюшин В. А., Сабанин В. Р., Смирнов Н. И.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
2. **Rojas R.** Neural Networks. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

Р.Ю. Романенко, студ.; рук. А.В. Цыпин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ

С развитием технологий жизнеобеспечения зданий появляется возможность автоматизации всех инженерных систем здания.

Автоматизация инженерных систем здания позволяет существенно уменьшить расходы на коммунальные услуги, повысить энергоэффективность, повысить комфорт ежедневной эксплуатации жилья, автоматизировать рутинные дела, снизить затраты на обслуживающий персонал, осуществлять управление и контроль работы сложнейших систем без участия человека, централизованно собирать показатели работы и ошибки технически сложного оборудования.

Если говорить о коммерческом секторе, то, помимо снижения потребления энергоресурсов, автоматизация здания может существенно повысить эффективность рабочего процесса. Это обеспечивается за счет постоянной освещенности, контролем за концентрацией углекислого газа, мешающей плодотворной мозговой деятельности, за счет эффективной вентиляции и правильным температурным режимом [1].

В процессе разработки методики построения систем диспетчеризации, были сформулированы критерии оценки протоколов передачи данных, при создании интеллектуального здания. На основании данного перечня критериев можно осуществлять сравнение и выбор наиболее целесообразных протоколов передачи данных, для различных типов зданий. В перечень критериев вошли такие пункты, как количество поддерживаемых устройств в сети; дальность передачи данных; распространенность; помехозащищенность; защищенность от взлома; простота использования и т.д. Также были рассмотрены методологии построения систем освещения, отопления, кондиционирования, контроля доступа, подход осуществлялся с точки зрения задачи, проблемы, с последующими описаниями путей их решения.

Литература

1. **Кремлев А.С., Титов А.В., Шукин А.Н.** Проектирование систем интеллектуального управления домашней автоматикой. Элементы теории и практикум: учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 96 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПТК SPPA T-3000 С ДРУГИМИ СОВРЕМЕННЫМИ ПТК ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В настоящее время на российском рынке услуг для энергетики представлен довольно широкий ряд различных отечественных и зарубежных поставщиков АСУ ТП на базе ПТК. Принципиальным отличием SPPA-T3000 (SIEMENS) от других ПТК, является встроенность всех компонентов в единую систему с единым полем информации и едиными принципами их внутреннего взаимодействия [1]. Характерными преимуществами SPPA-T3000 перед другими ПТК являются:

- наличие единого виртуального сервера приложений, объединяющего функции сервера операторского интерфейса, архивного сервера, инженерной и диагностической станций;
- использование в качестве базовой WEB-технологии с ее трехуровневой моделью;
- единый пользовательский интерфейс для всех функций;
- новые возможности по связи (интеграции) с другими ПТК, интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами;
- высокая готовность с независимыми функциями и резервированием;
- возможность обработки и хранения данных с разрешением от миллисекунд до часов и суток.

Система SPPA-T3000 была специально разработана для выполнения всех задач автоматизации электростанции: управление энергоблоком, расчетные задачи и интеграция с системами сторонних производителей. Более того, система SPPA-T3000 не только обеспечивает выполнение традиционных задач управления энергетическими установками, но также обеспечивает мощную поддержку при адаптации к условиям применения, что дает широкие возможности по выполнению всех требований к конкретному проекту.

Однако есть ряд критериев, сравнение по которым представляется сегодня также важным, кроме заявленной производителем функциональности ПТК. Это — информационная безопасность, импортозамещающие возможности, стоимостные характеристики самого ПТК и дальнейшей эксплуатации и проч. В связи с этим представляется актуальным и важным провести такое многокритериальное сравнение.

Литература

1. Мезин С.В., Зверьков В.П. Подготовка и реализация проектов АСУТП на базе ПТК SPPA T-3000 фирмы Сименс: метод. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2012. 73 с.

О.С. Рыжков, асп.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ НАСТРОЙКЕ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

В работе показаны результаты сравнительного анализа качества работы автоматических систем регулирования (АСР) с классическим линейным объектом регулирования в виде последовательной цепочки трех апериодических звеньев и с линейным и нелинейным ПИ-регулятором. Анализ выполнен на имитационной динамической модели АСР универсального назначения [1].

Основными показателями качества работы рассматриваемых АСР являются степень затухания и интегральный показатель качества. Первый показатель выполняет функцию ограничения, с помощью которого определяется оптимальное соотношение максимального отклонения с последующим, второй — определяет качество регулирования для системы (чем меньше данный показатель, тем более качественно произведена настройка регулятора).

Для проведения расчетов нелинейной системы учитывалось влияние следующих параметров [2]: зона нечувствительности; люфт; время полного оборота ИМ; минимальная длительность импульса ШИМа; ограничение регулирующего органа.

В результате проводимых расчетов оптимальных настроек для нелинейной и линейной систем были получены зависимости:

- интегрального показателя качества от величины возмущения равной: 0,2, 0,4, 0,8, 1;
- степени затухания от величины коэффициента передачи и зоны нечувствительности;
- степени затухания от величины длительности импульса и зоны нечувствительности.

Данный анализ представляет возможность находить оптимальные настройки систем регулирования с учетом влияния нелинейных параметров. Учет данных параметров увеличивает точность оптимального решения.

Литература

1. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления. // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004 г. № 3—4. С. 78—85.
2. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления: учебное пособие. М.: Наука, 1988. С. 256.

О.С. Рыжков, асп.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОИСКА КОМПРОМИССНЫХ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В работе реализован способ нахождения настроек ПИ-регулятора каскадной автоматической системы регулирования (АСР) при регулировании объекта с изменяющимися параметрами. Принятая динамическая модель построена на основе физического сосредоточенного представления процесса генерации насыщенного пара в парогенераторах [1] с дополнением аperiodических звеньев и звена запаздывания для учета процесса транспорта пара к турбинам.

Особенностью задачи является малая инерционность объекта регулирования, обостряющая влияние нелинейных свойств технических средств регулирования (зоны нечувствительности и минимальной длительности импульсов ШИМ).

Кроме этого к настраиваемой АСР предъявлены жесткие требования надежной работы без возникновения колебательных процессов на достаточно большом диапазоне от 10 до 100 % изменения нагрузок объекта регулирования

Поэтому оптимизация АСР проведена с использованием алгоритма численной многопараметрической оптимизации [2] с декомпозицией задачи на два уровня: настройки дифференциатора в малоинерционном внутреннем контуре и пропорционально-интегрального регулятора во внешнем инерционном контуре [3].

Данный способ позволяет находить оптимальные настройки в задачах, когда влияние нелинейностей в технических средствах регулирования является существенным и преобразование системы в более простой вид невозможно.

Литература

1. **Плютинский В.И., Погорелов В.И.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС: учебник для техникумов. М.: Энергоатомиздат. 1983. С. 296.
2. **Андрюшин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.** Управление и инноватика в теплоэнергетике: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
3. **Миронов В.Д.** Регулирование с опережающим импульсом // Известия ВТИ. 1948. № 8.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И АСР В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Исследование функционирования объекта управления и АСР в условиях реальных возмущений является одной из ключевых задач [1]. В России большая часть вырабатываемой электроэнергии происходит на тепловых электрических станциях (ТЭС). Паровой котел является основным агрегатом на ТЭС. В данной работе котел ТГМП-314 был рассмотрен как объект управления, а в качестве АСР была выбрана АСР температуры перегретого пара. Понимание процессов, протекающих при реальных возмущениях, дает возможность предотвращать аварийные ситуации на производстве, принимая превентивные меры по их устранению.

В процессе исследования был произведен расчет качества работы одноконтурной и двухконтурной АСР температуры перегретого пара, находящейся под влиянием случайных помех. В качестве формирующих фильтров было использовано соединение трех апериодических, а также соединение колебательного и апериодического звеньев, соответственно. Данные структуры позволили определить влияние приведенной к выходу помехи на регулируемую величину – температуру перегретого пара. Физически приведенная помеха может характеризовать влияние температуры дымовых газов или расхода перегретого пара на регулируемую переменную.

С помощью программного средства MathCad были смоделированы случайные процессы (помехи) для одноконтурной и двухконтурной АСР температуры перегретого пара при вариации их частотных свойств. На основании исследования установлены зависимости дисперсий на выходе АСР к дисперсиям, приведенным к выходу помехи (D_x/D_y) при изменении постоянной времени (T), для АСР, настроенных оптимально на минимум линейного интегрального показателя.

Данное исследование дает наиболее полную картину о процессах, протекающих при реальных возмущениях. На его основе возможна реализация предиктивной аналитики, направленной на определение вероятности наступления аварийной ситуации и формирование рекомендаций по недопущению их возникновения.

Литература

1. Щедеркина Т.Е., Волгин В.В., Определение вероятностных характеристик случайных процессов. М.: Издательство МЭИ, 2004.

Л.А. Сагитова, асп.; рук. А.А. Гаврилова, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОВ

В настоящее время актуальной является проблема повышения эффективности энергопроизводства в условиях ограничения средств на модернизацию энергетического оборудования. Одним из вариантов ее решения является использование оборудования в наиболее эффективных режимах. Таким образом, актуальной является проблема определения показателей эффективности энергетического производства и оптимального распределения нагрузки котельной на отдельные котлоагрегаты с учетом их фактического состояния.

Одним из методов получения оценок сравнительной эффективности может служить метод DEA (Data Envelopment Analysis), позволяющий построить глобальный критерий оценки по совокупности данных о работе объекта или множества объектов. Преимуществом этого метода является возможность использования совершенно разных частных критериев эффективности в качестве входных параметров [1].

Для сравнения 5 котлов ТП-230, работающих на производительности 170 т.п./ч, используем следующие частные критерии: удельный расход топлива $G_{\text{топл}}$; удельный расход электроэнергии на тягу и дутье $\mathcal{E}_{\text{ТД}}$; температуру уходящих газов $t_{\text{ух.н}}$; отклонение от оптимального значения разжения в топке котла ΔP_n ; содержание в продуктах сгорания оксидов азота $V_{\text{NO}_{x,n}}$, оксидов углерода $V_{\text{CO}_{x,n}}$; диоксидов углерода $V_{\text{CO}_{2x,n}}$.

Сравнивая глобальный критерий эффективности всех котлов на заданной нагрузке, можно определить наиболее эффективный котел и рекомендовать к загрузке. Для создания рекомендаций по распределению нагрузок всей котельной необходимо провести аналогичный анализ для всего диапазона нагрузок. Таким образом, оптимизация выбора загрузки котлов способствует сокращению расходов ресурсов предприятия, что приведет к снижению себестоимости продукции.

Литература

1. Салов А.Г., Гаврилова А.А., Чиркова Ю.В., Сагитова Л.А. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал. 2016. № 2. С. 140—146.

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА АЭС

Силы, возникающие в гидроагрегате и действующие на отдельные элементы конструкции агрегата, могут быть как постоянными, так и переменными во времени. Действие этих сил проявляется в виде деформации отдельных элементов агрегата, их вибрации, а также вибрации агрегата в целом [1].

Повышенный уровень вибрации приводит к преждевременному износу, а вследствие этого и выходу из строя технологического оборудования, что, несомненно, может привести к аварии. Подобного варианта развития событий можно было бы избежать, если бы эксплуатационный персонал своевременно и правильно реагировал на информацию о повышении вибрации. Непрерывное наблюдение за уровнем механической вибрации позволяет определить причины неисправностей и быстро и целенаправленно их устранить.

Целью данной работы является прогнозирование работоспособности турбоагрегата в условиях реальной работы, что представляет собой перспективную область в сфере контроля и диагностики.

Для исследования в данной работе была выбрана следующая характеристика – среднее квадратичное значение виброскорости опор подшипников, т.к. она наиболее показательна при определении состояния турбины. Виброскорость опор подшипников – это скорость движения рабочей трущейся поверхности подшипников и корпуса по отношению к неподвижной опорной точке в пространстве под действием вибрации движения.

Существуют различные способы прогнозирования. Для решения поставленной задачи был выбран метод оптимизации по интервальным моделям целевой функции [2]. В качестве исходных данных выступает архив СКЗ виброскорости опор подшипников турбины АЭС. Данный подход позволяет оценить степень угроз, влияющих на качество работы турбоагрегата и предложить методы решения поставленной задачи.

Литература

1. **Владиславлев Л.А.** Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций М.: Энергия, 1972.
2. **Воцинин А.П.** Метод оптимизации объектов по интервальным моделям / под ред. В.П. Бородюка. М.: МЭИ, 1987.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА АСР С РЕГУЛЯТОРОМ И ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

АСР с регулятором и дифференциатором применяются на ТЭС, например, для регулирования температуры острого пара. Они повышают качество регулирования, но при их расчете необходимо определить большее количество параметров настройки, нежели в одноконтурной АСР. Существует ряд методов, позволяющих осуществить расчет упомянутой системы. Каждый из них имеет преимущества и недостатки. Целью данной работы является сравнительный анализ следующих методов:

1. Последовательный расчет контуров [1];
2. Метод многомерного сканирования [1];
3. Компенсированная настройка во временной области [2];
4. Компенсированная настройка в частотной области [3];

Переходные характеристики исследуемого объекта приведены на рис. 1. Переходные процессы по каналу регулирующего воздействия для настроек, полученных с помощью перечисленных методов, приведены на рис. 2, номера графиков соответствуют номерам методов в списке.

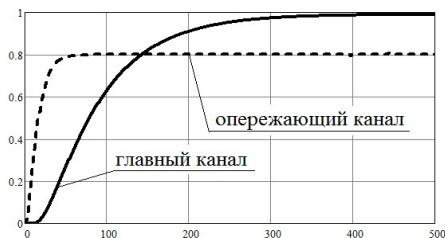


Рис. 1. Переходные характеристики объекта

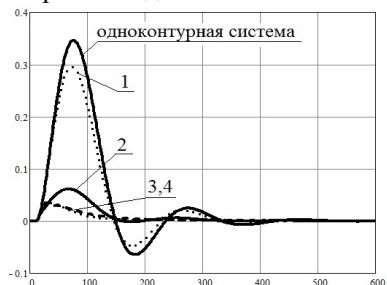


Рис. 2. Переходные процессы в АСР

Из представленных результатов видно, что в данном случае метод №1 неэффективен, а компенсированная настройка (методы № 3 и 4) обеспечивает хорошее качество переходного процесса.

Литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Миронов В.Д. Регулирование с опережающим импульсом // Изв. ВТИ, 1948.
3. Панько М.А. Расчет автоматических систем регулирования с дифференцированием вспомогательной регулируемой переменной // Теплоэнергетика. 1998. № 10.

М.А. Ставцев, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРАТОРА PMT49D/1 И КАЛИБРАТОРА YOKOGAWA CA12E

Данные калибраторы широко используются в промышленности, они предназначены для поверки и настройки работающего оборудования без снятия его со стенда.

Регистраторы предназначены для измерения, регулирования и регистрации температуры и других неэлектрических величин (частоты, давления, расхода, уровня и др.), преобразованных в электрические сигналы силы, напряжения постоянного тока и активного сопротивления постоянному току. Значения измеряемых величин отображаются на цифровом индикаторе прибора и на бумажной диаграммной ленте в виде графика [1].

Целью данного задания является модернизация лабораторной работы с использованием современных систем измерения и регистрации полученных нами величин.

Максимальная погрешность, полученная в результате опыта, составила $0,6^{\circ}\text{C}$, а величина предельно допустимой погрешности равна $0,725^{\circ}\text{C}$. Исходя из этого мы можем сделать вывод, что собранная нами система соответствует техническим требованиям и пригодна для эксплуатации.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных оценки показали целесообразность использования калибратора электрических сигналов в качестве образцового средства, имитирующего сигнал термометра сопротивления для выполнения поверочных работ со вторичным прибором PMT49D/1 ввиду высокого класса точности и удобства его эксплуатации.

Литература

1. **Руководство по эксплуатации** приборов PMT49D и YOKOGAWA CA12E.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРОВОГО КОТЛА ТЭЦ МЭИ

В настоящее время осуществляется модернизация парового котла на ТЭЦ МЭИ. Для проведения различных исследований была разработана динамическая модель (рис. 1) для дальнейшего анализа ее работы и создания имитационной модели в программной среде Simulink MatLab.

u_i – неконтролируемые случайные возмущения

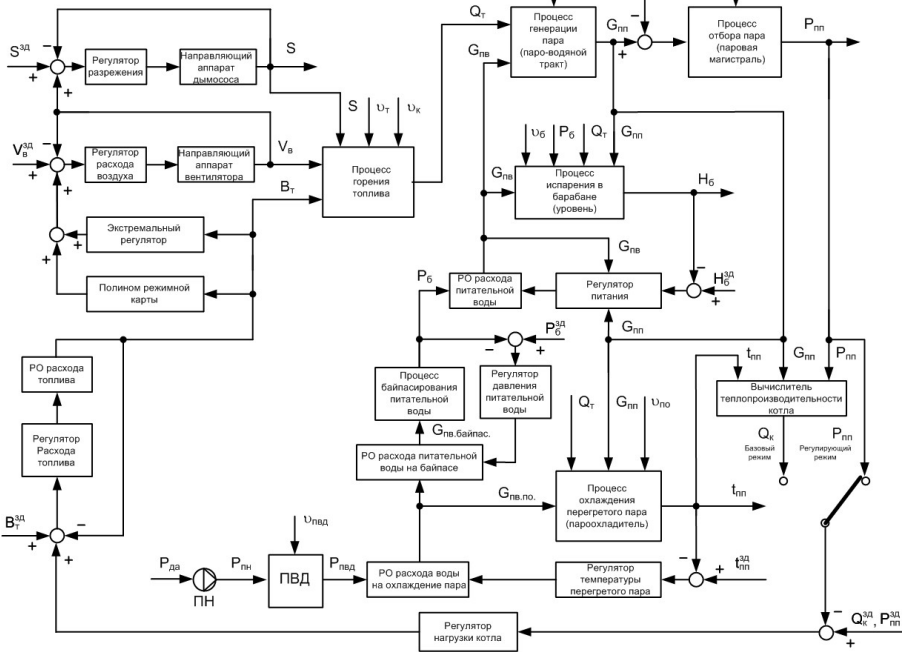


Рис. 1. Динамическая модель парового котла ТЭЦ МЭИ

Реализация этой модели в программной среде позволит существенно облегчить процесс пуско-наладочных работ, имитировать различные эксперименты на «тяжелые» возмущения и синтезировать поиск оптимальных настроек линейных регуляторов для связанных систем регулирования.

А.А. Старостин, асп.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ БЛОКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ / ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПАРОВОМ КОТЛЕ

В [1] был предложен командный блок экстремального регулятора (ЭР) для реализации алгоритма поиска экстремального значения в системах автоматического регулирования промышленных объектов.

Как показали результаты исследований [2], после достижения экстремального значений, командный блок ЭР продолжает работать и стабилизируется вокруг экстремального значения, что приводит к незатухающим колебаниям. Ранее это явление было описано [3].

Как известно, периодические колебания отрицательно влияют на работу теплоэнергетического оборудования в целом и приводят к уменьшению ресурса исполнительных механизмов.

Применение блока автоматического включения/отключения (БАВО), позволит исключить указанные выше недостатки. Принцип действия основан на измерении частоты сигнала на выходе из командного блока ЭР для сигнала на отключение и изменении расхода топлива в единицу времени топлива для сигнала включения командного блока ЭР.

Литература

1. **Сабанин В.Р., Коптев В.С., Кормилицын В.И.** Командный блок для экстремального регулятора // Патент РФ 2475797, опубл. 20.02.2013.
2. **Имитационная** модель парового котла со связной системой автоматического регулирования нагрузки и экономичности с экстремальным регулятором / В.Р. Сабанин, А.А. Старостин, А.И. Репин, А.И. Попов // Теплоэнергетика. 2016.
3. **Либерзон Л.М., Родов А.Б.** Системы экстремального регулирования. М.–Л.: Энергия, 1965. 160 с. с ил.

*Ю.А. Стружинская, асп.; рук. И.А. Болдырев, к.т.н.
(филиал МЭИ в г. Волжском)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГБЛОКА В АСУ ТП ТЭС

Расчет технико-экономических показателей (ТЭП) занимает одно из центральных мест в комплексе функциональных задач АСУ ТП энергоблоков. Результаты расчетов ТЭП позволяют создать информационную базу для автоматизации решения основных задач управления технологическим процессом и производственно-хозяйственной деятельностью ТЭЦ, в том числе для оперативного воздействия на регулируемые параметры по обеспечению оптимальной экономичности оборудования.

Расчету непосредственно ТЭП предшествуют этапы, связанные подготовкой исходных данных для расчета:

- определение достоверности входных сигналов;
- расчет термодинамических параметров;
- расчет расхода и удельных объемов сред;
- определение приведенных расходов сред;
- определение рабочих точек по расчетным картам.

Как известно, расчет ТЭП с использованием мгновенных значений входящих в них параметров технологического процесса является некорректным в связи с рассогласованием по времени значений, используемых в расчете технологических параметров. Например, между теплотой, вводимой с топливом и выводимой с первичным и вторичным паром, существует временной сдвиг, зависящий от динамических свойств котла, связанных с его тепловой инерцией. Для компенсации указанного сдвига производится усреднение контролируемых параметров, которые входят в расчетные формулы оценки ТЭП. В настоящее время расчет оперативных значений ТЭП производится каждые 15 минут по усредненным за этот интервал времени значениям оперативно-регулируемых параметров.

Для повышения оперативности решений, принимаемых на основании результатов расчета ТЭП, необходимо повысить частоту расчета.

В настоящее время проводится оценка возможности повышения оперативности обновления текущих значений ТЭП путем подбора оптимальных алгоритмов усреднения значений технологических параметров, используемых в расчете. Исследованы погрешности, вносимые в результаты расчета при использовании разных алгоритмов и периодов усреднения.

Ю.А. Стружинская, асп.; рук. М.М. Султанов, к.т.н., доц.
(филиал МЭИ в г. Волжском)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

В условиях оптового рынка электроэнергии в Российской Федерации одним из основных направлений деятельности генерирующих компаний является максимизация финансовой прибыли [1]. Этого можно добиться путем эффективного планирования работы электростанции на краткосрочную и долгосрочную перспективы. Планирование на краткосрочную перспективу предполагает определение оптимальных режимов работы оборудования, а планирование на долгосрочную перспективу — осуществление выбора оптимального состава включенного генерирующего оборудования. Для решения всех перечисленных задач необходимо создать алгоритм определения оптимальных режимов работы оборудования станции.

Оптимальный режим работы оборудования выбирается исходя из значения отпускаемой электроэнергии, которое, в свою очередь, определяется из расчета среднемесячного значения удельного расхода условного топлива (УРУТ) на отпуск тепловой энергии. Для расчета последнего необходимо определить суточные значения отпуска тепловой энергии для каждого месяца, что основывается на расчете переводного коэффициента доли распределения тепловой нагрузки по месяцам года. Данными для расчета переводного коэффициента является суммарная (отопительная и паровая) среднечасовая тепловая нагрузка, которая формируется из архива суточных статистических данных по ТЭЦ.

Разработанный алгоритм ляжет в основу программного продукта, который будет осуществлять определение оптимальных режимов работы оборудования и объемов отпускаемой электроэнергии электростанции. Также программный продукт будет обладать функцией отслеживания и оценки действий оперативного персонала электростанции по принятию решений выбора режима загрузки оборудования и позволит обеспечить высокую эффективность энергопроизводства.

Литература

1. [Электронный ресурс]. URL: <http://электротехнический-портал.рф/ekonomika-i-upravlenye-v-electroenergetike/58-systema-rynkov-v-electroenergetike/314-sostav-i-vzaimosvyazy-rynkov.html>

А.С. Сутягин, студ.; рук. Т.Е. Щедркина, к.т.н., доц. (НИУ МЭИ)

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Одним из наиболее значимых показателей экономической эффективности электростанции является расход топлива. Любое отклонение от оптимального распределения нагрузки между энергоблоками электростанции может привести к значительному увеличению потребления топлива, что приводит к увеличению затрат на производство электроэнергии. Поэтому оптимальное распределение нагрузок между энергоблоками является одной из приоритетных задач верхнего уровня АСУ ТП электростанции.

Существует несколько методов поиска оптимального решения. В работе рассматриваются различные алгоритмы оптимизации: метод неопределенных множителей Лагранжа, метод динамического программирования, метод модифицированного генетического алгоритма [1, 2]. При использовании метода неопределенных множителей Лагранжа учитываются технологические ограничения на нагрузки энергоблоков, а также обосновывается приоритетность перевода конкретных энергоблоков на минимальные или максимальные допустимые нагрузки. Проводится сравнение эффективности использования метода динамического программирования и метода модифицированного генетического алгоритма в данной задаче.

В работе для каждого из перечисленных методов были разработаны программы расчетов в среде MathCad, для одного из алгоритмов реализована программа на языке C++. В качестве исходных данных были приняты типовые расходные характеристики энергоблоков ТЭС разной мощности. На основании проведенных расчетов удалось сравнить полученные результаты и сделать заключение о целесообразности применения соответствующего алгоритма и программы.

Разработанное программное обеспечение может быть рекомендовано при реализации АСУ ТП на ТЭС с использованием принципа управления оборудованием в режиме «советчика оператору».

Литература

1. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // EXPONENTA PRO, математика в приложениях. 2004. №3 – 4 (7 – 8). С. 78—85.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ МУНИЦИПАЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ ГОРОДА СМОЛЕНСКА

В данном случае под инженерными коммуникациями будем понимать следующие системы: система отопления и теплоснабжения; системы горячего и холодного водоснабжения; система канализации.

Обследование инженерных коммуникаций – это комплекс мероприятий, проводимый для оценки их текущего состояния и функциональных возможностей, выявление дефектов и неисправностей, их соответствия проектной и исполнительной документации, а также действующим нормативным документам [1–3].

В ходе обследования ставятся следующие вопросы: каковы моральный и физический износ обследуемых инженерных коммуникаций, а также каково их техническое состояние и соответствует ли оно нормативным требованиям.

В ходе обследования коммуникаций дошкольных и школьных учреждений г. Смоленска были выявлены следующие недостатки:

Физический износ:

1. Выход из строя запорной арматуры на вводах теплоносителя – 90 %;
2. Частичная коррозия трубопроводов отопления – 35 %;
3. Частичная коррозия трубопроводов горячего водоснабжения – 40 %;
4. Частичная коррозия трубопроводов холодного водоснабжения – 70 %;
5. Частичная коррозия трубопроводов канализации – 80 %;
6. Необходимость промывки системы отопления в связи с недостаточным качеством теплоносителя – 100 %.

Моральный износ:

1. Отсутствие возможности регулировать расход теплоносителя в системе отопления у потребителя – 70 %;
2. Отсутствие контрольно-измерительных приборов на вводах системы отопления – 40 %;
3. Отсутствие контрольно-измерительных приборов на вводах горячей и холодной воды – 80 %.

Литература

1. **ГОСТ Р 53778—2010.** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
2. **СП 30. 13330.2012.** Внутренний водопровод и канализация зданий-актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85*.
3. **СП 124.13330.2012.** Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.

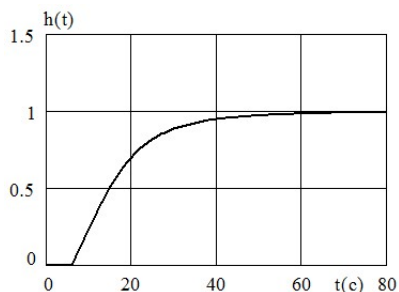
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ПРИБЛИЖЕНИЯ К СУБОПТИМАЛЬНОМУ РЕГУЛЯТОРУ ДЛЯ АСР С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Рассматривается вопрос выбора параметров для метода расчета настройки [1], названного его авторами как универсальный беспоисковый. Для метода необходимо подбирать постоянную времени сглаживателя T_c и диапазон частот приближения $[\omega_1; \omega_2]$ для КЧХ субоптимального и реального регуляторов. Даются рекомендации по выбору этих параметров для АСР с ПИД-регулятором и моделью объекта с передаточной функцией вида

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об} \exp(-s \beta T_1)}{(T_1 s + 1)(n T_1 s + 1)},$$

где $K_{об}$ — коэффициент передачи;

T_1 — постоянная времени; n, β — коэффициенты. Целью является получение аperiodического процесса регулирования при ступенчатом изменении задания, что в ряде практических случаев является необходимым. При разработке рекомендаций выполнены серии расчетов для различных сочетаний параметров модели объекта, характерных для тепловых объектов управления: $\beta = 0,33 \dots 1$; $n = 5 \dots 40$. На основании расчетов получены следующие результаты: 1) значение параметра T_c можно определять по формуле $T_c = 2 \cdot \beta \cdot T_1$, что согласуется с [1]; 2) зависимость верхней частоты приближения ω_2 от параметров объекта может быть аппроксимирована в безразмерном виде формулой $\Omega_{гр} = 1 / \sqrt{n + \beta}$, где $\Omega_{гр} = \omega_2 T_1$; $\omega_2 = \Omega_{гр} / T_1$. Нижнюю частоту приближения ω_1 можно задавать по формуле $\omega_1 = \omega_2 \cdot 0,2$.



На рисунке приведен переходный процесс в системе с ПИД-регулятором и объектом ($K_{об} = 1$; $T_1 = 16$; $n = 5$; $\beta = 0,4$), настроенной в соответствии с приведенными рекомендациями. Характер процесса является аperiodическим.

Литература

1. Бурцева Ю.С., Пикина Г.А. Универсальный метод настройки линейных регуляторов. М.: Издательство МЭИ, 2016. 32 с.

РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО НЕКАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

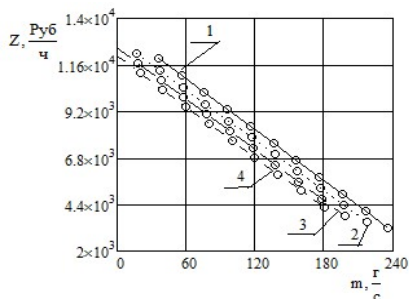


Рис. 1. Зависимость затрат от массового выброса ЭЭХ: 1 — $D=1050$ т/ч; 2 — $D=970$ т/ч; 3 — $D=890$ т/ч; 4 — $D=810$ т/ч [2]

Для эффективного управления выбросами оксидов азота необходимо располагать специальными характеристиками (математическими моделями), учитывающими экологические, экономические и технологические параметры источника выброса. Такие характеристики называются эколого-экономические (ЭЭХ). ЭЭХ показывает зависимость затрат (руб/ч), на атмосферно охранные мероприятия, от выбросов вредного вещества при различных нагрузках парового котла (рис. 1) [1].

Расчет состоит из экспериментального или расчетного получения затрат для разной подачи карбамида при фиксированном значении нагрузок; расчета массового выброса для тех же значений нагрузки и подачи карбамида; объединения этих зависимостей в таблицу; аппроксимации этих зависимостей с целью получения аналитической модели ЭЭХ в виде:

$$Z1(D, m) = a1 + a2D + a3D^2 + (b1 + b2D + b3D^2)m,$$

где $a1 = 1.109 \cdot 10^4$; $a2 = -2.198$; $a3 = 4.788 \cdot 10^{-3}$; $b1 = -43.570$;

$$b2 = 1.353 \cdot 10^{-6}; b3 = -7.136 \cdot 10^{-10}.$$

Литература

1. Комарова Г.В., Парчевский В.М. Методические указания по определению экономической эффективности атмосферных мероприятий ТЭС на примере рециркуляции дымовых газов. М.: Издательство МЭИ, 1992.

2. Модернизация котельной установки для блока №3 Каширской ГРЭС с целью снижения выбросов оксидов азота / А.А. Смышляев, С.А. Евдокимов, Л.Г. Дубовицкая и др. // Электрические станции. 2008. № 1. С. 2—8.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАГМЕНТА СХТМ ВХР

В настоящее время повышается уровень автоматизации на производстве. Для выполнения требований экологической безопасности, экономичности выработки электроэнергии, а также обеспечения нормальной работы оборудования широко внедряется комплексная автоматизация, в том числе в энергетике, а системы химико-технологического мониторинга водно-химического режима (СХТМ ВХР) рассматриваются как составная часть АСУТП ТЭС. В связи с этим была поставлена задача разработать модель фрагмента СХТМ ВХР с обеспечением вывода данных на компьютер оператора.

Модель разрабатывалась на базе лабораторного стенда, оснащенного приборами производства НПП «Техноприбор» [1], контроллером и персональным компьютером. Ее структура приведена на рис. 1.

В моделируемый фрагмент входили: устройство подготовки пробы и прибор «Лидер-3» (измеряющий рН теплоносителя, содержание ионов Na и содержание кислорода O₂ в теплоносителе).

Анализируемая вода поступает через УПП в «Лидер-3», где измеряются рН пробы, концентрацию ионов натрия и кислорода. В жидкокристаллической панели «Лидер-3», полученные данные преобразуются в цифровую форму. Жидкокристаллические панели УПП и «Лидер-3» подключены к контроллеру, связь с которым осуществляется по RS-485. В свою очередь от контроллера информация по Ethernet поступает в компьютер оператора, где представляется ему в удобной форме.

На базе этой модели обеспечивается вывод информации оператору и хранение; таким образом, оператор может выполнять непрерывный мониторинг ВХР. Благодаря внедрению такой системы оператор может своевременно получить данные не только о параметрах пробы, но и о работе датчиков, чтобы при необходимости отследить их исправность. Это существенно повышает надежность, улучшает качество работы, достоверность измерений и надежность всей системы в целом.

Литература

1. [Электронный ресурс]. Сайт НПП «Техноприбор». URL: <http://www.tehnopribor.ru/>.



Рис. 1.

*А.А. Шилов, А.А. Образцов, студенты;
рук. В.Ф. Кузищин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КОНЦЕПЦИЯ МОБИЛЬНОЙ АСУ ТП ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ВЫСОКОСОЛЕВЫХ ЖРО АЭС

Для эффективного решения проблемы переработки ЖРО на АЭС нужно поставить мобильную систему ионоselectивной очистки [1]. Однако для такой системы необходима специфичная мобильная АСУ ТП. Концепция такой системы управления предполагает следующее:

- размещение технологического оборудования системы ионоselectивной очистки в транспортировочных контейнерах;
- размещение ПТК АСУ системы ионоselectивной очистки внутри этих же контейнеров.

Такой подход к проектированию АСУ ТП имеет следующие преимущества по сравнению с классическими подходами:

- высокая степень готовности;
- снижение объема монтажа и наладки технических средств;
- малая стоимость и удобство доставки, особенно морским способом;
- отсутствие необходимости в сооружении вспомогательных зданий;
- вариативность архитектуры АСУ ТП;
- гибкость системы в отношении использования оборудования АСУ ТП различных поставщиков;
- поставляемая система не привязана жестко к конкретному технологическому процессу;
- функциональное разнообразие поставляемых в контейнерах систем и оборудования.

Данная система позволит сократить расходы на захоронение ЖРО, а после завершения очистки отходов система может быть собрана и перевезена на другую АЭС.

Литература

1. Арустамов А.Э., Зинин А.В., Красников П.В. и др. Метод ионоselectивной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 11.

Направление
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

Научный руководитель направления —

директор ЭнМИ, к.т.н.,
профессор С.А. Серков

Секция 47

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИГАТЕЛИ

Председатель секции — директор ЭНМИ к.т.н., профессор

С.А. Серков

Секретарь секции — к.т.н., доцент А.И. Лебедева

Р.А. Алексеев, асп.; С.А. Бойков, студ.;
рук. И.Ю. Гаврилов, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАТОК ТУРБИНЫХ РЕШЕТОК С ПОМОЩЬЮ КРИВЫХ БЕЗЬЕ

Совершенствование аэродинамических характеристик лопаток осевых турбин является одной из основных задач при проектировании современных турбомашин. Особенно важна эта проблема при организации межлопаточных каналов турбин, работающих во влажном паре. Помимо аэродинамической эффективности профиля, в данном случае важную роль играет вопрос эрозионного износа поверхностей лопаток, который возникает из-за наличия в потоке дискретной фазы.

Эрозионный износ лопаток в проточных частях паровых турбин на данный момент минимизируют за счет удаления пленок жидкости с поверхностей межлопаточных каналов, а также использования эрозионно-устойчивых материалов. Другим способом уменьшения эрозии в паротурбинных решетках, учитывающим наличие жидкой фазы в канале, является профилирование лопаток [1].

Представленная методика профилирования основана на применении параметрических кривых Безье.

Кривые Безье обладают рядом преимуществ, которые важны при профилировании лопаток [2]: они являются гладкими кривыми (первая и вторая производные существуют и непрерывны); повторяют опорную линию, сформированную узловыми точками; лежат в выпуклой оболочке, порожденной массивом узловых точек.

Процессы взаимодействия частиц жидкой фазы со стенками лопаток сложно поддаются моделированию. Особенно это касается их взаимодействия с жидкими пленками, поэтому на данный момент оптимизация профиля с точки зрения жидкой фазы должна производиться на основе серии экспериментальных данных. Однако некоторые потоки капель могут быть

смоделированы численными методами, подогнанными под результаты эксперимента. В представленной работе автор попытался смоделировать формирование «фонтана» вторичных капель, образовавшегося у входной кромки лопатки, и с помощью численного расчета оптимизировать входную часть профиля.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 16-19-10484.

Литература

1. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. **Шикин Е.В., Плис А.И.** Кривые поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996.

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ГОРЕЛОК ПО СХЕМЕ ВСС

В работе рассмотрена возможность оптимизации размещения в топке прямоточных горелок с периферийной подачей пылевоздушной смеси (рис. 1), имеющих встречно-смещенную компоновку (рис. 2).

Задача решается для котлов $D \leq 670$ т/ч, сжигающих бурые и каменные угли в режиме ТШУ, оборудованных СМС с промбункером воздушной или газозвушной сушкой топлива при подаче топлива в топку отработанным сушильным агентом.

Граничные условия по числу горелок в зависимости от паропроизводительности котла и их скоростному режиму принимаются по [1].

В ходе расчетов определен диапазон значений $b_1, h, b_r, b_2, h/b_0, B_0/b_0, S_{бок}/b_0$, обеспечивающих нужную степень взаимного проникновения потоков горелок противоположных стен, для стабилизации процесса горения и минимального динамического воздействия факела на экраны топки. В качестве критерия принята величина параметра

$$W = \frac{B_0 - b_0}{b_m \sqrt{\frac{h}{b_0}}} \quad (1)$$

Для шлакующих топлив $W = 0,085—0,096$, для нешлакующих $W = 0,06—0,085$.

В результате расчетов найдены области для определения возможных значений относительного шага между горелками $\overline{B_0}$ с учетом ограничений по $b_1, h/b_r, W, q_f$.

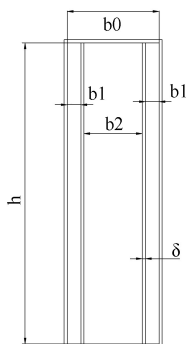


Рис. 1. Схема горелки с периферийной подачей пылевоздушной смеси

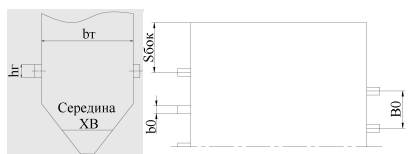


Рис. 2. Компоновка горелок по схеме ВСС

Литература

1. Изюмов М.А., Росляков П.В. Проектирование и расчет горелок / под ред. Т.В. Виленского. М.: Издательство МЭИ, 1990.

А.В. Бобров, студ.; рук. Л.Е. Егорова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАЛОТОКСИЧНАЯ ГОРЕЛКА С ФОРСИРОВАННОЙ ВНУТРЕННЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Развитие теплоэнергетики в настоящее время определяется необходимостью решения проблемы защиты атмосферного воздуха от вредных выбросов, в том числе оксидов азота.

Одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов оксидов азота является использование малотоксичных горелочных устройств.

Для исследования была выбрана малотоксичная горелка с форсированной внутренней рециркуляцией продуктов сгорания (рис. 1).

Снижение концентрации NO_x происходит за счет предварительного перемешивания газа и воздуха до стехиометрического соотношения с последующим сжиганием с организацией внутренней рециркуляции продуктов горения. За счет предварительного перемешивания обеспечивается стабильное сжигание, а рециркуляция продуктов сгорания приводит к уменьшению уровня температуры пламени. Снижения максимальных температур факела обеспечивается, в том числе за счет увеличения его поверхности и как следствие увеличения теплопередачи из пламени. В результате уменьшается образование как «термических», так и «быстрых» оксидов азота [1].

Для исследования влияния различных конструктивных параметров горелки и режимных факторов на выбросы оксидов азота проведены численные эксперименты с помощью CFD-моделирования в программном комплексе ANSYS. Модель конструкции горелки разработана при помощи пакета SolidWorks.

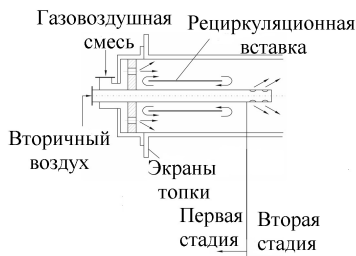


Рис. 1. Схема малотоксичной горелки с форсированной внутренней рециркуляцией

Выполнены исследования влияния на выход NO_x геометрических размеров рециркулирующей вставки, места ввода и количества вторичного воздуха, скорости подачи газовоздушной смеси. Результаты расчета влияния избытка воздуха на образование оксидов азота при наличии рециркулирующей вставки и без нее показали хорошую сходимость с результатами исследований в ВТИ.

Литература

1. Росляков П.В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

А.А. Вихлянцев, асп.; рук. А.В. Волков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НОВОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

На сегодняшний день существует ряд актуальных проблем, связанных с совершенствованием насосного оборудования. Специфика данных проблем продиктована условиями эксплуатации, определяющими конструкцию насосов (применяемые материалы, геометрию, типы уплотнений и др.), температурные и расходные режимы. Анализ основных тенденций и требований, предъявляемых к насосному оборудованию, с учетом особенностей его эксплуатации позволяет выделить следующие направления совершенствования центробежных насосов, реализация которых возможна за счет применения новых подходов к синтезу элементов проточной части [1, 2]:

- 1) расширение рабочей зоны насосов, повышение интегрального КПД (актуально в условиях существенной неравномерности расходов [3].);
- 2) повышение максимального достижимого КПД (решения применимы при стационарных режимах работы по расходу.);
- 3) улучшение вибрационных и шумовых характеристик насосов, повышение ресурса (актуально для насосов, работающих в экстремальных условиях или при ограниченном доступе для ремонта и обслуживания, ответственных, а также эксплуатируемых в жилых помещениях насосов.)

Грамотная постановка задачи синтеза элементов проточной части новой геометрии, многовариантной даже в рамках одного концептуального решения, является одним из ключевых факторов, влияющих на конечный результат.

Представляемые результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения №14.577.21.0227 от 29.09.2016 г. (уникальный идентификационный номер исследований RFMEFI57716X0227).

Литература

1. **Вихлянцев А.А., Волков А.В.** Перспективы создания насосного оборудования для интеллектуальных систем тепло- и водоснабжения // Гидравлические машины, гидроприводы и гидро-пневмоавтоматика: Тез. докл. XIX ВНТК студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ. 2015. 132 с.
2. **Вихлянцев А.А., Волков А.В.** К вопросу о проектировании насосного оборудования для Smart-систем водоснабжения // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 9. С. 15.

И.А. Громилин, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ 3D ПЕЧАТИ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В современном энергетическом машиностроении традиционные методы разработки прототипов и рабочих образцов постепенно вытесняются системами автоматизированного проектирования (САПР). Это позволяет сэкономить много временных, людских и материальных ресурсов на пути от чертежа до готового продукта[1].

В рамках выпускной бакалаврской работы была произведена модернизация блока регулирующего клапана с обратным подводом пара. Для отработки технических решений совместно с кафедрой Инженерной графики (НИУ «МЭИ») была произведена печать модели блока клапана с обратным подводом пара на 3D принтере uPrint SE (рис. 1), работающим по технологии послойного нанесения и спекания ABS-пластика.



Рис. 1. Процесс печати модели регулирующего клапана

Использование САПР и метода 3D печати позволило в меньшем масштабе отработать технические решения, выявить и устранить недостатки прототипа до этапа натурных испытаний, а также избежать излишних временных и материальных затрат при выявлении конструкторских недоработок во время производства полномасштабных моделей.



Рис. 2. Готовая модель клапана

После завершения экспериментальных исследований готовая модель (рис.2) была передана на кафедру ПГТ им. А. В. Щегляева для использования в качестве наглядного пособия в процессе обучения.

Литература

1. **Gibson Ian, Rosen David W., Stucker Brent** Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. New York, NY [u.a.]: Springer, 2015.

*И.А. Громилин, В.А. Власов, студенты; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ

Несмотря на постоянно проводимые исследования и публикации в технических изданиях полученных результатов, проблема совершенствования регулирующих клапанов остается достаточно острой, так как известны примеры, когда по вине низкой надежности регулирующих клапанов было невозможно обеспечить бесперебойную эксплуатацию паровых турбин.

Отсюда следует необходимость поиска таких решений, реализация которых обеспечила бы и высокую надежность, и минимальные потери в регулирующих клапанах.

подавляющее большинство конструкций клапанов выполняются по традиционной «прямоточной» схеме, в которой пар вначале поступает в клапанную коробку и далее, при подъеме золотника, через выходной диффузор поступает в корпус турбомашин [1].

Однако такая схема не всегда отвечает требованиям компоновки органов паровпуска на ряде типов турбомашин, где технические условия не позволяют устанавливать клапаны такого рода.

В этой связи необходимы принципиально новые решения, которые можно реализовать как в рамках существующих блоков клапанов, так и при создании совершенно новых конструкций.

Одним из таких решений может быть использование регулирующих клапанов с обратным подводом пара, в которых пар подводится под золотник, затем проходит клапанную коробку и поступает в турбомашину.

Такая конструкция в ряде случаев позволяет значительно упростить компоновку клапанов на корпусе турбомашин и избежать лишних разворотов паровпускного тракта.

Следует отметить, что в целом конструкции клапанов с обратным подводом пара по экономичности явно проигрывают клапанам «традиционного» исполнения, так как из-за отсутствия в них отводного диффузора, трудно обеспечить такой же низкий уровень потерь.

Именно по этой причине профилирование проходного тракта и моделирование течений в нем являются наиважнейшими задачами в вопросе модернизации регулирующих клапанов паровых турбин.

Литература

1. **Зарянкин А.Е., Симонов Б.П.** Регулирующие и стопорно-регулирующие клапаны паровых турбин. М.: Издательство МЭИ, 2005. 360 с.

А.А. Гурьянова, А.Ю. Ревенко, студенты;
рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

Известно, что наиболее сложный элемент турбины — это последняя ступень. Увеличение ее длины (при той же частоте вращения n) и кольцевой площади Ω в значительной мере характеризует технический уровень турбинного завода. Одним из прогрессивных путей решения этой задачи является изготовление лопаток из титанового сплава [1].

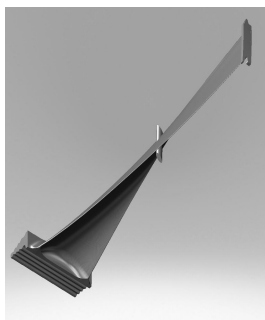


Рис. 1. 3D модель рабочей лопатки

В связи с этим рассматривается принципиальная возможность создания перспективной паровой турбины с ЦНД повышенной пропускной способностью с рабочей лопаткой последней ступени длиной 1400 мм (рис. 1), работающей в условиях глубокого вакуума.

В результате проектирования сопловая лопатка имеет сложную пространственную форму; она изогнута против потока на периферии для подстройки под направление потока на периферии при большом меридиональном раскрытии проточной части.

При проектировании рабочей лопатки учитывалось, что все сечения работают при сверхзвуковых скоростях на выходе и поэтому специально обрабатывались базовые плоские сечения. Предварительные оценки показали, что работа по сокращению потерь в последней ступени позволит снизить эти потери примерно на 2—3%.

Дальнейшее повышение эффективности возможно за счет создания предпоследней ступени и работы над совершенствованием обеих ступеней вместе.

Литература

1. Pollak H., Pfitzinger E-W, Thamm N., Schwarz M.A. Design And Materials For Modern Steam Turbines With Two Cylinder Design Up To 700 MBt. Siemens A.G, 2005.

А.А. Гусев, асп.; рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНОШАГОВЫХ МНОГОГРЕБЕНЧАТЫХ УПЛОТНЕНИЙ (РМУ)

На турбинах ПАО «Мосэнерго» РМУ до сих пор не нашли своего применения, хотя за рубежом их применяют достаточно часто.

В настоящей работе была поставлена задача экспериментально оценить степень влияния на расходные характеристики РМУ различных сочетаний шагов гребешков на роторе и статоре и разработать практические рекомендации по применению РМУ. Специфика поставленной задачи состоит в изготовлении большого количества моделей роторных и статорных частей РМУ для проведения эксперимента.

Для решения поставленной задачи была спроектирована и изготовлена установка, конструктивная схема которой представлена на рис. 1.

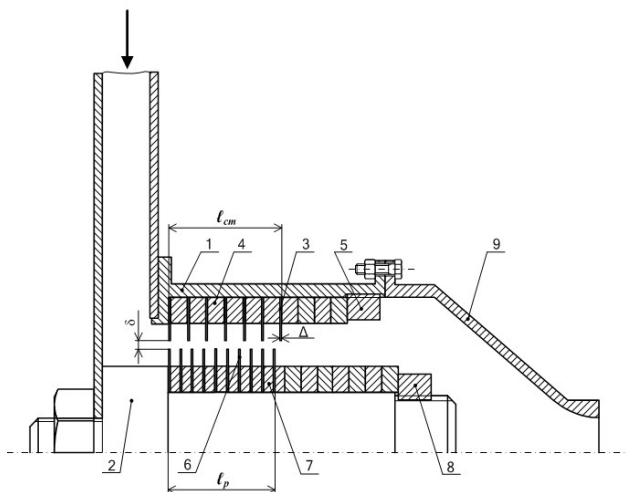


Рис. 1. Конструктивная схема установки для исследования РМУ: 1 – корпус; 2 – ось; 3 – гребешок статора; 4 – проставка статора; 5 – гайка; 6 – гребешок ротора; 7 – проставка ротора; 8 – гайка; 9 – сопло

Всего было продумано 28 конфигураций РМУ, каждая конфигурация исследована в четырех режимах. Полученные результаты позволяют проводить самые разнообразные сравнения и сопоставления. Наиболее оптимальным по расходным характеристикам можно считать модельную пару с проставками на роторе и статоре 4 мм и 5 мм соответственно, т.е. с шагом 4,8 и 5,8 мм.

*М.Р. Дасаев, асп.; А.Б. Тхабисимов, инж.;
рук. А.Ф. Медников, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА СТАЛИ 20Х13 С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Основными причинами абразивного износа лопаточных аппаратов и других элементов проточной части цилиндров высокого давления (ЦВД) и цилиндров среднего давления (ЦСД) мощных паровых турбин является взаимодействие с их функциональными поверхностями высокотемпературного (до 550 °С) двухфазного потока, содержащего твердые частицы магнетита Fe_3O_4 , поступающих из пароперегревательных труб парогенератора и паропроводов.

Сложность изучения процесса абразивного износа заключается в его статистическом характере, вследствие того что твердые частицы эродента имеют различную форму, движутся по случайным траекториям и взаимодействуют с поверхностями элементов конструкций турбомашин с различными скоростями и под разными углами [1].

Основным пассивным способом борьбы с абразивным износом является упрочнение функциональной поверхности или формирование защитных покрытий.

Настоящая работа посвящена исследованиям влияния защитного ионно-плазменного покрытия на основе TiN на интенсивность абразивного износа стали 20Х13. Экспериментальные исследования проводились на специализированном стенде по изучению процессов абразивного износа, обработка полученных результатов проводилась с применением метода статистического анализа размеров отраженных твердых частиц [1].

В результате проведенных исследований выявлено, что при максимальном угле атаки газоабразивного потока, который для стали 20Х13 составляет 30° [2], покрытие на основе TiN не менее чем в 2 раза увеличивает длительность инкубационного периода основного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Приказа № 184 от 10 марта 2015 г.

Литература

1. Селезнев Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б. Анализ поведения статистических характеристик эродента при абразивном износе конструкционных материалов // Вестник МЭИ. № 5. 2015. С. 25—29.
2. Селезнев Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б. Влияние угла атаки газоабразивного потока на эрозионный износ плоской мишени из стали 20Х13 // Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 116—119.

*М.Р. Дасаев, асп.; А.Б. Тхабисимов, инж.;
рук. А.Ф. Медников, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ ЛОПАТОЧНЫХ СТАЛЕЙ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В последние десятилетия в связи с использованием в энергетическом машиностроении паровых турбин ТЭС повышенной мощности проблема эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней приобрела первостепенное значение.

При переходе на повышенные параметры пара разрабатываемые рабочие лопатки последних влажно-паровых ступеней будут иметь длину 1400÷1500 мм при частоте вращения ротора турбины 50 Гц, что предопределяет увеличение окружных скоростей вращения таких лопаток на периферии до 800 м/с. Ударное воздействие жидких частиц при таких скоростях интенсифицирует процессы эрозии входных кромок рабочих лопаток, что поднимет на новую ступень актуальность решения проблемы эрозионного износа. Вследствие этого остро встает проблема создания и применения новых материалов, а также разработки новых составов покрытий и различных способов модификации функциональных поверхностей рабочих лопаток, которые будут эффективно противостоять высокоскоростному каплеударному воздействию [1].

Настоящая работа посвящена исследованиям влияния модификации поверхностного слоя лопаточных сталей 12Х13 и ЭИ961 на интенсивность процесса каплеударной эрозии. Экспериментальные исследования проводились с использованием стенда «Эрозия-М» НИУ «МЭИ».

В результате проведенных исследований выявлено, что модификация поверхности позволяет не менее чем в 3 раза увеличить длительность инкубационного периода лопаточных сталей. Рассмотренный способ упрочнения поверхности может быть весьма перспективным для снижения интенсивности эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин.

Результаты работы получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения № 14.577.21.0180 от 27.10.15 г. (уникальный идентификационный номер RFMEFI57715X0180).

Литература

1. **State-Of-The Art, Problems and Methods to Improve Erosion Resistance of Materials Used for Manufacturing of Turbines** / G.V. Kachalin, A.F. Mednikov, A.B. Tkhabisimov, E.A. Zhukova // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. 7(5). P. 955—963.

А.Л. Домрачев, асп.; рук. А.Д. Трухний, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПТУ НА РЕЖИМ РАБОТЫ ПГУ ПРИ ПУСКОВЫХ ОПЕРАЦИЯХ ПГУ

В последние 20 лет на тепловых электростанциях России стали вводиться в эксплуатацию утилизационные парогазовые установки с котлами-утилизаторами (без дожигания и байпаса уходящих газов).

Вводимые энергоблоки ПГУ отличающиеся высокими технико-экономическими показателями (КПД установки при работе на газообразном топливе около 49—59 %), по сравнению с традиционными энергоблоками ТЭС на органическом топливе [1].

Вместе с тем режимы эксплуатации введенного оборудования ПГУ при работе их параллельно с энергосистемой таковы, что в течение суток мощность их изменяется в достаточно широком диапазоне нагрузок 60—100 % номинальной, определяемом суточным графиком нагрузки, при этом требования к маневренности утилизационных ПГУ более жесткие по сравнению с требованиями для традиционных энергоблоков ТЭС.

Также отличительной особенностью ПГУ является высокая скорость нагружения при включении в сеть.

Существует два подхода к проведению нагружения энергоблока ПГУ:

1. Включение в сеть ГТУ и набор на ней максимальной мощности. При этом скорость нагружения ограничивается термонапряженным состоянием КУ и ГТУ. Далее подключение ПТ.

2. Включение в сеть ГТУ, набор на ней промежуточной мощности, определяемой по номограмме выбора стартовой нагрузки ГТУ для обеспечения пусковых параметров пара перед стопорными клапанами ПТ, включение ПТ в сеть, набор максимальной мощности ГТУ и ПГУ в целом.

Особенности пусковых операций современных ПТУ (на примере SST5-5000 фирмы «Сименс»):

1. Высокая степень готовности, время набора вакуума, достаточного для сброса пара через БРОУ, менее 10 минут.

2. Отсутствие ручных операций, полная автоматизация пусков.

3. Возможность выбора оператором при пуске паровой турбины скорости нагружения: медленный, нормальный или ускоренный.

4. Быстрый прогрев турбины. Продолжительность выхода на режим холостого хода около 10 минут при пуске из холодного состояния.

5. Выход на номинальную мощность менее 20 минут при пуске из горячего состояния.

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 648 с.

А.В. Дремучкин, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОТЛА БКЗ-320-140-560ГМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Важнейшей задачей для отечественной энергетики является повышение экологической безопасности, в том числе удовлетворение требованиям регламентирующих документов по выбросам вредных веществ в атмосферу. Это особенно актуально для котлов, изготовленных и пущенных в эксплуатацию в 60-е годы XX века, когда эти выбросы не ограничивались.

Котел БКЗ-320-140-560ГМ, станционный № 7 Уфимской ТЭЦ-2, относится именно к таким объектам, хотя вполне работоспособен. Выбросы оксидов азота NO_x за котлом, приведенные к $\alpha = 1,4$, составляют 350—420 мг/м³, а снизить их за счет режимных мероприятий невозможно.

На станции установлено несколько таких котлов, которые в деталях отличаются друг от друга. Но все они работают без рециркуляции продуктов сгорания в топку — это не было предусмотрено проектом. Как известно, использование рециркуляции газов позволяет не только понизить выбросы NO_x , но и работать с проектной температурой перегрева при сжигании мазута на пониженных нагрузках. Но в данном случае последняя проблема решается не за счет газов рециркуляции, а за счет увеличенной поверхности пароперегревателя. Существует даже проблема с нехваткой конденсата на впрыски при сжигании газа на нагрузках, близких к номинальной.

Проведенные автором предварительные оценки показали, что введение в топку газов рециркуляции в количестве 15 % позволит заметно понизить выбросы NO_x , особенно при одновременном использовании ступенчатого сжигания. Но эти мероприятия приводят к росту тепловосприятия ступеней пароперегревателя, что при нехватке конденсата на впрыски вызовет увеличение температуры перегретого пара выше допустимого значения 560+5°C. Поэтому снизить выбросы оксидов азота без реконструкции пароперегревателя нельзя.

Расчетные исследования, выполненные автором с использованием программы *Boiler Designer*, позволили определить объем реконструкции поверхностей нагрева. Оптимальным вариантом является сокращение холодной конвективной ступени пароперегревателя вдвое. Но это вызовет рост температуры уходящих газов и снижение КПД котла. Поэтому одновременно необходимо увеличить на 1/3 поверхность нижнего пакета экономайзера. После реконструкции котел сможет сжигать газ как с рециркуляцией, так и без нее во всем диапазоне нагрузок. Возможно даже сжигание мазута без рециркуляции, но лишь на нагрузках, близких к номинальной.

Результаты выполненной работы могут быть использованы при разработке проекта реконструкции таких котлов.

А.А. Дружинин, асп.; рук-ли А.В. Волков, д.т.н., проф.;
А.Г. Парыгин, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДОВ МАЛЫХ И МИКРОГЭС

Рассматривается микроГЭС с сифонным водоводом [1]. На основе исследований ее конструкции (рис. 1) установлены величины гидравлических потерь в проточной части водовода нового типа и пути их снижения. Расчетные методы [2] не позволяют точно дать оценку с учетом конструктивных особенностей объекта.

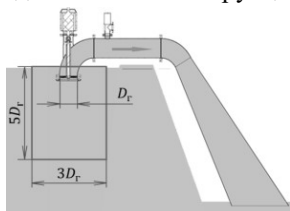


Рис. 1. Эскиз микроГЭС с сифонным водоводом с сегментной расчетной областью

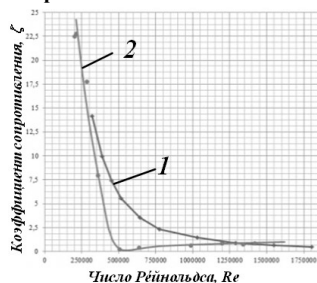


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная зависимости $\zeta=f(Re)$

Альтернативно предложено установить потери давления Δp по уравнению Дарси-Вейсбаха на основе виртуального эксперимента с 3D-моделью проточной части гидроагрегата микроГЭС, созданной в среде *SolidWorks* и расчетном пакете *FlowVision*. Коэффициент гидравлического сопротивления ζ (рис. 2) установлен экспериментально. Демонстрируется удовлетворительная сходимость результатов при малых и высоких числах Re . Обсуждается их расхождение с экспериментом на стенде в области $Re = (4 \dots 10) \cdot 10^5$. Моделирование дает адекватные результаты не во всем диапазоне исследуемых параметров, однако метод прогнозирования функции $\zeta = f(Re)$ можно считать применимым. Работа является основой для формирования исследовательской базы по повышению эффективности малых гидротурбин и позволяет выявить нестационарность течения в проточных частях, внести изменения в методику разработки микроГЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения № 14.577.21.0227 от 29.09.2016 г. (УИН RFMEFI57716X0227).

Литература

1. Волков А.В., Парыгин А.Г., Дружинин А.А. Расчетные и экспериментальные исследования энергетических характеристик пропеллерной гидротурбины низконапорной микроГЭС с сифонным водоводом: Сб. научн. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 9-10 июня 2016 г. СПб: Изд-во СПбГРУ, 2016. С. 21—30.

2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Н.А. Коренев, К.Д. Соловьёв, В.Е. Чумак, студенты;
рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С ВОДОРОДНЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Для технического перевооружения и сооружения новых ТЭС в России потребуются паротурбинные блоки с внедрением технических и конструктивных решений, направленных на повышение экономичности, надежности и маневренности с ориентировочным КПД не менее 45—46 %, достигнутым за рубежом против значений 36 % и ниже действующих энергоблоков на стандартные сверхкритические параметры.

Совершенствование ПТУ идет по трем основным направлениям. Самым действенным является совершенствование проточной части турбины. Вторым направлением является совершенствование тепловых схем и вспомогательного оборудования. И только повышение начальных параметров пара представляет существенно большие возможности [1].

С этой целью проведены расчеты тепловых схем и проведена оценка их эффективности при изменении параметров рабочего тела перед турбиной в широком диапазоне: давление менялось от 14 до 30 МПа, а температура – от 600 °С до 1500 °С (в таком же диапазоне находилось изменение температуры промежуточного перегрева).

Для достижения указанных значений температур в энергоустановке, работающей на водяном паре, использовался водородный промежуточный перегрев пара. Проведенные расчеты послужили основой для проведения анализа влияния термодинамических параметров рабочего тела и изменения его свойств на экономичность установки и выявили особенности, которые будут присущи вследствие этого влияния разрабатываемой высокотемпературной паровой турбине.

Выполнение паротурбиной установки по схеме 14 МПа/600/1250 °С показывает, что такое решение оказывается близким к газотурбинным установкам в части среднего давления, поскольку пар направляется на промежуточный перегрев как правило при давлении $p_{\text{пп}} = (0,1—0,2)p_0$. Таким образом, при выполнении паротурбинной установки по такой схеме, пар после промежуточного перегрева направляется в часть среднего давления с параметрами $p_{\text{пп}} = 3,2$ МПа и $t_{\text{пп}} = 1250$ °С, что соответствует начальным параметрам газа перед первой ступенью ГТУ.

Литература

1. **Разработка** технических решений по созданию турбоустановок для блока суперсверхкритических параметров пара / Г.Д. Авруцкий, И.А. Савенкова, М.В. Лазарев и др. // Энергетика за рубежом. 2005. № 10. С. 34—41.

НОВЫЙ РЕГУЛИРУЮЩИЙ КЛАПАН ДЛЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН С МИНИМАЛЬНЫМ ЗАГРОМОЖДЕНИЕМ КЛАПАННОЙ КОРОБКИ

Актуальность представленной работы определяется тем обстоятельством, что существующие клапаны занимают большую часть объема клапанных коробок, вызывая тем самым дополнительные потери и снижая вибрационную надежность указанных клапанов. Так, например, регулирующий клапан влажнопаровой турбины К-200-44 ХТГЗ занимает свыше 75 % объема клапанной коробки. В регулирующем клапане турбины К-1000-65 ЛМЗ тело клапана занимает около 60% объема клапанной коробки [1].

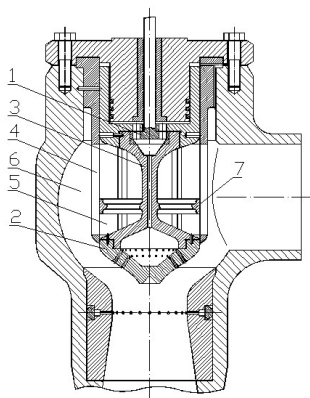


Рис. 1. Новый регулирующий клапан в открытом положении

Предлагается новая конструкция разгруженных клапанов, приведенная на рис. 1. В данном случае вся система разгрузки клапана смещена в верхнюю часть клапанной коробки и впервые разгрузочный клапан 1 выполнен поворотным, что исключает возможность развития автоколебаний. Золотник клапана 2 выполнен совместно со штоком 3 и перемещается внутри стакана 4 со сквозными окнами 5 для прохода пара, что резко снижает загромождение стаканом клапанной коробки 6. На цилиндрической части золотника 2 выполнен секторный прилив 7, обеспечивающий его центровку внутри стакана 4 при любом положении клапана.

При математическом моделировании течения в рассматриваемом клапане в качестве базы для сравнения были приняты габариты типичного клапана турбины К-800-240 ЛМЗ, помещенного в клапанную коробку, изображенную на рис.1. В результате было получено, что приведенные конструктивные изменения позволили на 23% снизить гидравлическое сопротивление клапана по сравнению с исходным базовым сопротивлением.

Литература

1. Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. Регулирующие и стопорно-регулирующие клапаны паровых турбин. М.: Издательство МЭИ, 2005.

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ЦНД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Эрозионный износ рабочих лопаток последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин приводит не только к снижению экономичности ступени, но и может вызвать разрушение пера лопатки [1]. В связи с этим актуальной задачей является оценка критического размера дефекта, вызывающего разрушение пера лопатки.

В настоящей работе оценка трещиностойкости проводилась для пера рабочей лопатки последней ступени ЦНД паровой турбины в составе двухконтурной ПГУ на базе двух газовых турбин GT13E2 фирмы Alstom мощностью 179,9 МВт. Длина пера рабочей лопатки составила 623 мм.

Критическая длина трещины зависит от величины суммарных напряжений в данной области пера лопатки σ_p и свойств металла.

Для расчета коэффициента интенсивности напряжений использовалась зависимость

$$K1 = \left[1,1 + 5 \left(\frac{l_{тр}}{b_k} \right) \right] / \left(1 - \frac{l_{тр}}{b_k} \right), \sigma_p \sqrt{\pi l_{тр}}, \quad (1)$$

где $K1$ — коэффициент интенсивности напряжений; $l_{тр}$ — длина трещины.

Значению критической длины трещины $l_{кр}$ отвечает условие: $K1 = K1c$, где $K1c$ — вязкость разрушения материала лопатки.

Результаты расчета критической длины трещины по длине лопатки представлены на рис. 1. Наибольшая эрозионная поврежденность входной кромки пера рабочей лопатки характерна для периферийного участка лопатки при относительной длине лопатки более 0,75 [1]. Для данной лопатки значение длины одиночной трещины 5 мм опасно в узкой области пера лопатки при относительной ее длине около 0,75. Появление одиночной трещины более опасно, чем группы дефектов, что реализуется при эрозионном износе. Поэтому проведенная оценка трещиностойкости идет в запас надежности.

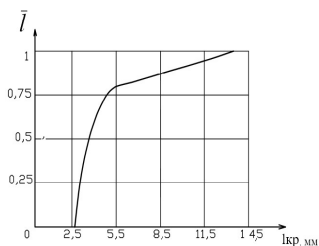


Рис. 1. Распределение значений критической длины трещины по длине пера рабочей лопатки

Литература

1. Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажнопаровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 9—12.

И.В. Молчанов, асп.; рук. А.Д. Трухний, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ОДНОВАЛЬНОЙ ПГУ НА БАЗЕ ГТУ SGT5-8000Н ФИРМЫ «СИМЕНС»

Для решения поставленной задачи был выполнен расчет и анализ тепловой схемы трехконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара в математической среде «Thermoflow». Данный математический пакет выдает достаточно точные результаты. Был произведен расчет проточной части паровой турбины с реактивным облопачиванием, с определением количества ступеней частей высокого, среднего и низкого давления. Выполнен расчет последней ступени ЦНД ПТ для обоснования длины рабочей лопатки последней ступени.

В состав ПГУ-570 входят:

- одна газотурбинная установка (ГТУ) SGT5-8000Н фирмы «Siemens»;
- котел-утилизатор (КУ) с тремя контурами генерации пара и промежуточным перегревом, контуры среднего и высокого давления генерируют пар по прямоточному принципу и не имеют барабана-сепаратора; в работе рассмотрена горизонтальная конструкция такого котла-утилизатора;
- одна паротурбинная установка (ПТУ) конденсационного типа.

Выбранная газотурбинная установка SGT5-8000Н серийно производится и поставляется фирмой «Siemens», обладает конкретными техническими характеристиками, которые в наибольшей степени соответствуют современным требованиям СО ЕЭС РФ к подобному оборудованию. Поэтому ниже представлены технические требования к основному и важнейшему вспомогательному отечественному оборудованию паровой части цикла ПГУ [1].

Особенностями тепловой пусковой схемы блока ПГУ-570 являются:

- применение интегрированного в барабан низкого давления деаэратора и двухбайпасной схемы обвода паровой турбины;
- установка встроенных сепараторов за испарителями ВД и СД, расположенными на верхней отметке КУ.

В результате расчетов тепловой схемы, выполненной на математической модели «Thermoflow» подтверждены высокие экономические показатели ПГУ (при нормальных условиях):

- мощность ПГУ брутто – 568,7 , МВт;
- КПД ПГУ брутто – 60,26 %.

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ВЫХОДНОМ СЕЧЕНИИ ШИРОКОУГОЛЬНОГО ДИФFUЗОРНОГО КАНАЛА С УГЛОМ РАСКРЫТИЯ 40°

На рис. 1 показан вид исследованного плоского диффузорного канала. Отрыв потока от отклоняющейся стенки начинался с входного сечения; в выходном сечении фиксировалась застойная область, занимавшая порядка 60 % площади сечения. С целью ликвидации этой застойной зоны и выравнивания выходного поля скоростей параллельно отклоняющейся стенке внутри канала устанавливались пластины (рис. 1), выявлено оптимальное месторасположение пластин, при котором снижение потерь энергии было максимальное.

В точках 1—7 на боковых стенках канала в выходном сечении (рис. 1, измерялись пульсации давления.

На рис. 2 показано, как изменяется среднеквадратичное значение амплитуд пульсаций давления, отнесенное к перепаду давления на канал.

Как видно, вблизи прямой стенки канала в области около точки 2 в исходном случае без пластин фиксируется максимум интенсивности пульсаций давления, который составляет порядка 13 % перепада давления. В области вблизи отклоняющейся стенки, в застойной зоне, интенсивность пульсаций давления резко уменьшается и составляет всего 3 % перепада давлений.

При установке двух пластин резко уменьшается интенсивность пульсаций в области основного потока у прямой стенки канала. В целом, как видно из рис. 2, распределение интенсивности пульсаций давления по выходному сечению становится более равномерным, а общий уровень пульсаций — существенно ниже.

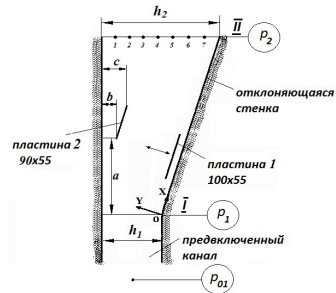


Рис. 1. Вид исследованного диффузорного канала

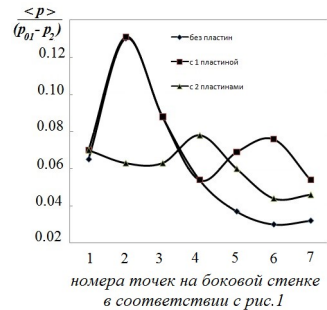


Рис. 2. Относительная интенсивность пульсаций давления в выходном сечении

А.В. Низовой, студ.; рук-ли **В.Ф. Касилов**, к.т.н., доц.;
Т.В. Богомолова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГБЛОКОВ ПГУ И ПТУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА СВБР-100

В классическом энергоблоке АЭС мы сталкиваемся с такими проблемами как низкий КПД установки, а также расширение влажного пара в проточной части турбины, что вынуждает использовать дорогостоящий сепаратор пароперегреватель (СПП), тем самым усложняя конструкцию турбоагрегата. Повысить КПД и параметры пара перед турбиной можно, используя парогазовую технологию в энергоблоке АЭС.

В данной работе был рассмотрен вариант тепловой схемы с ядерным реактором СВБР-100. Модульный реактор СВБР-100 на быстрых нейтронах спроектирован для работы с жидкометаллическим теплоносителем – сплавом свинец-висмут [1].

В комбинированном цикле представлены две газотурбинные установки GE6101FA общей мощностью 140МВт, а также паротурбинная установка, которой была присвоена маркировка К-180-6.7.

Паровая турбина двухцилиндровая с совмещенным цилиндром высокого и среднего давления, и цилиндром низкого давления.

Благодаря ядерному реактору и пароперегревательным секциям, в котле-утилизаторе генерируется перегретый пар с температурой 565 °С, что позволяет отказаться в схеме от СПП. Результаты расчета показали, что применение парогазовой технологии позволяют повысить КПД установки с 35.5% [2] в классическом энергоблоке АЭС с тем же реактором СВБР-100 до 45.9% в новом исполнении, а также увеличить мощность установки почти в 3 раза.

Литература

1. **Модульные** многоцелевые свинцово-висмутовые быстрые реакторы для ядерной энергетики / А.В. Зродников, Г.И. Тошинский, О.Г. Григорьев и др. // Теплоэнергетика. 2005. № 1. С. 16—24.

2. **Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Господченков И.В.** Эффективность использования парогазовой технологии в энергоблоке АЭС с ядерным реактором СВБР-100 // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 14—20.

К.Б. Ольшанников, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР СО СПИРАЛЬНОЙ НАВИВКОЙ ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 1200 т/ч ДЛЯ АЭС С ВВЭР

Актуальность ядерной энергетики в современном мире растет. В России доля вырабатываемой электроэнергии на АЭС составляет около 18,6 % от всего производимого на электростанции электричества.

Основная выработка электроэнергии АЭС приходится на энергоблоки с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). Они используются на двухконтурных отечественных атомных электростанциях, где важным элементом блока являются горизонтальные парогенераторы (ПГ), конструкция которых отработана огромным эксплуатационным и технологическим опытом промышленности.

В данной работе была сделана попытка создания конструкции парогенератора АЭС вертикального типа со спиральной навивкой. Преимущества таких парогенераторов — плохая теплогидравлическая неравномерность по сравнению с горизонтальными ПГ и более удобная компоновка с реактором. Также спиральная поверхность нагрева имеет равную длину труб пучка, это позволяет равномерно распределить расход теплоносителя во всех трубках.

Во время разработки конструкции автором была выполнена оптимизация конструкции парогенератора из условия достижения минимальных приведенных затрат на производство и эксплуатацию при соблюдении граничных условий:

- диаметр корпуса не более 4,5 м; возможна перевозка парогенератора по линиям железнодорожного транспорта;

- масса парогенератора не должна превышать 500 т;

- внутренний диаметр коллектора теплоносителя не менее 0,5 м;

Основные характеристики разработанного парогенератора АЭС:

- паропроизводительность – 1200 т/ч;

- тепловая мощность – 632 МВт;

- скорость теплоносителя – 4,6 м/с;

- площадь поверхности теплообмена – 4335 м²;

- внешний диаметр – 3546 мм;

- габаритная высота – 17539 мм;

- масса ПГ – 138 т;

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХЪЯРУСНОГО ЦНД МОЩНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТУРБИН

Предлагаемое решение состоит в создании перспективного двухъярусного ЦНД повышенной пропускной способности (рис. 1) на базе «вилочатых» двухъярусных лопаток [1]. Разработанная концепция предполагает наличие в одной двухъярусной ступени независимых лопаточных аппаратов верхнего и нижнего яруса, имеющих свои собственные оптимальные параметры. Интегральный диаграммный внутренний относительный КПД разработанного ЦНД составляет 87.1%. Расчетный запас прочности «вилочатой» лопатки длиной 1200 мм равен 2,3. Для практической реализации проекта разработана технология изготовления двухъярусных лопаток. Актуальность проблемы вытекает из стремления в максимальной степени сократить удельную металлоемкость паротурбинных блоков. Эта задача решается за счет резкого увеличения пропускной способности одного потока ЦНД.

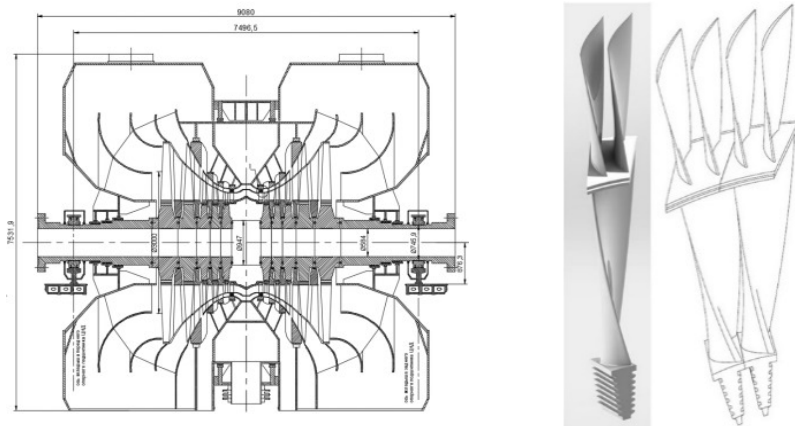


Рис. 1. Двухъярусный ЦНД

Литература

1. Zaryankin A., Rogalev A., Garanin I., Osipov S. Methods of low-pressure cylinders throughput improvement for construction of ultra-high capacity generation units // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2015. 195. P. 149—160.

А.А. Павлов, студ.; рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ГИБРИДНЫЙ ПАРОТУРБИННЫЙ БЛОК С ВОДОРОДНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Актуальность представленного сообщения вытекает из очевидного стремления максимально повысить КПД выработки электроэнергии на базе ТЭС с минимальным загрязнением окружающей среды. В полной степени этим требованиям удовлетворяют высокотемпературные блоки ПТУ с водородным перегревом пара.

Однако обеспечить такой перегрев при высоких начальных параметрах давления пара ($P_0 \geq 30$ МПа) практически невозможно. В связи с этим предполагается осуществить паропаровой перегрев пара после энергетического котла паром существенно более высокой температуры после низконапорной водородной камеры сгорания [1], где перегревается часть пара после цилиндра среднего давления.

Тепловая схема ТЭС представлена на рис. 1. Пар после ЦСД при давлении $P_{\text{ЦСД}} = 1,1$ МПа подводится к камере сгорания, где его температура повышается до 1000 °С, пар используется для перегрева пара идущего от энергетического котла, до температуры 700 °С, и остаточной части пара после ЦСД до температуры 620 °С в подогревателе смешанного типа. Расчеты показали, что КПД такого блока повышается до 48 %.

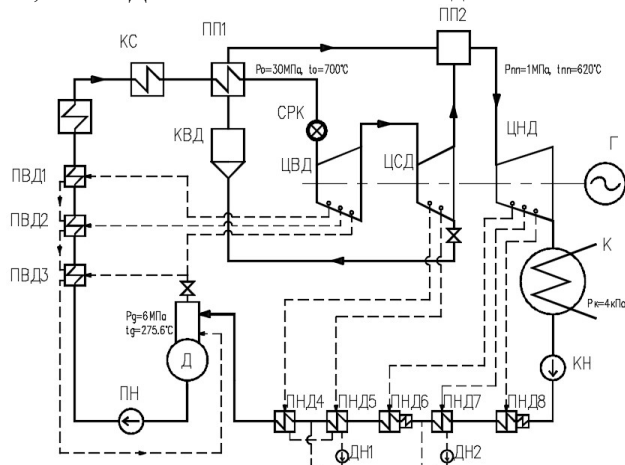


Рис. 1. Тепловая схема гибридной ПТУ с водородным перегревом пара

Литература

1. Роголёв А.Н. Гибридная АЭС с водородным перегревом пара. Автореф. дисс....канд. техн. наук. М., МЭИ, 2012.

М.А. Плахова, П.А. Кляжников, студенты;
рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ТУРБОУСТАНОВКИ К-1000-60/1500 ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДО 107 %

Как известно, совершенствование паровой турбины — это универсальный способ повышения экономичности ТЭС и АЭС, который всегда дает эффект, и чем менее совершенна турбоустановка, тем больший эффект от совершенствования турбины может быть получен [1].

Применительно к проточным частям турбин паровых турбин, работающих на влажном паре, имеются существенные резервы повышения их экономичности и надежности. Например, экономичность ЦВД работающих влажнопаровых турбин ниже на 12—13 % по сравнению с турбинами на перегретом паре, хотя по существующим на сегодняшний день представлениям, снижение не должно превышать 6—7 %.

Для оценки резервов повышения мощности турбины за счет совершенствования ЦВД влажнопаровой турбины, доля мощности которого составляет порядка 1/3 от мощности турбины, проведены оценочные расчеты (табл. 1). В качестве базы для сравнения был принят исходный ЦВД турбины К-1000-65-1500.

Таблица 1
**Предельно возможные значения повышения мощности ЦВД
влажнопаровых турбин**

№	Способ повышения мощности ЦВД	Повышение мощности, %	
		активное облопачивание	реактивное облопачивание
1	Снижение потерь при течении пара в сопловых и рабочих решетках	12,0	6,5
2	Устранение потерь от трения диска	0,3	-
3	Оптимизация уплотнений ступени	0,8	2,0
4	Уменьшение потерь от влажности	8,2	11,3
5	Снижение потери с выходной скоростью	2,3	0,6
6	Переход на реактивное облопачивание	-	4,0
Всего:		23,6	24,4

В заключении необходимо отметить, что более существенные резервы повышения экономичности турбоустановок имеются в цилиндрах низкого давления, доля мощности которых от мощности турбины составляет 2/3.

Литература

1. Трухний А.Д., Булкин А.Е. Тихоходные паровые турбины атомных электрических станций: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 364 с.

А.Д. Полищук, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ

Разработка котла-утилизатора начинается с расчета его тепловой схемы. Важными проектными решениями, определяющими конструкцию, эффективность и надежность [1] котла являются:

- выбор минимальных температурных напоров в поверхностях теплообмена;
- максимальная скорость продуктов сгорания на входе в котел;
- соотношение сторон газохода.

Уменьшение минимального температурного напора в испарителе котла-утилизатора приводит к увеличению расхода пара. Отрицательным явлением является увеличение поверхности теплообмена и ухудшение циркуляции [2] в трубах испарителя с малым температурным напором.

Большинство разработанных рекомендаций для традиционных котлов [3] не годятся при проектировании котлов-утилизаторов.

Цель работы: исследовать влияние основных проектных решений на конструкцию, эффективность и надежность котла-утилизатора.

Задачи работы:

1. Определить влияние скорости продуктов сгорания.
2. Определить влияние температурного напора перед перегревательными поверхностями нагрева.
3. Определить влияние температурного напора перед испарительными поверхностями нагрева.
4. Определить минимальную температуру рабочего тела на входе в экономайзер (ЭК) и газовый подогреватель конденсата (ГПК).

В ходе исследования были получены зависимости влияния температурного напора на металлоемкость и надежность его работы. На протяжении исследования постоянными оставались значения температуры продуктов сгорания на входе и выходе из котла-утилизатора.

Литература

1. **Плешанов К.А., Стерхов К.В., Зайченко М.Н.** Расчет динамических характеристик котла-утилизатора Новогорьковской ТЭЦ // Электрические станции. 2015. № 4. С. 10—15.
2. **Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Расчет циркуляции котла-утилизатора ПР-76-3.3-415 // Труды Международной научно-практической конференции “Boiler Designer-2014”. 2014. С. 77—82.
3. **Изюмов М.А.** Методология принятия технических решений на стадии проектирования паровых котлов. М.: Издательство МЭИ, 1999.

Е.А. Рябцев, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПИЛОТНОГО ОБРАЗЦА ПОЛИРЯДНОГО КОНДЕНСАТНОГО НАСОСА

Незаменимые для функционирования ТЭС конденсатные насосные электроагрегаты (как традиционные центробежные гидромашин, так и различные перспективные конструкции, сочетающие в себе насосы первого и второго подъемов) имеют ряд существенных недостатков, изложенных в публикации [1].



Рис. 1. Пилотный образец полирядного конденсатного насоса в процессе сборки

В рамках проекта по модернизации основного насосного оборудования мощных ТЭС был спроектирован конденсатный насосный агрегат в различных инновационных исполнениях. Проведенные расчетно-теоретические исследования, результаты которых приведены в [1], подтверждают принципиальную работоспособность и конкурентоспособность спроектированного агрегата, осевые рабочие органы которого основаны на парадигме полирядности [2].

В целях повышения степени достоверности результатов расчетно-теоретического исследования, а также для формулирования окончательных суждений об эффективности полирядного конденсатного насосного агрегата, было принято решение сконструировать и изготовить пилотный образец полирядного насоса (рис. 1). Проточная часть модельного насоса совпадает с проектным вариантом. Отдельные элементы (уплотнительные и опорные узлы) проектировались исходя из финансовых возможностей. В данный момент производится монтаж насоса на стенд и подготавливается программа основных энергокавитационных испытаний в соответствии с ГОСТ 6134-87.

Литература

1. **Рябцев Е.А.** Результаты исследования рабочего процесса осевого трехрядного лопастного конденсатного насоса первого подъема для энергоблока гигаваттного класса // Инженерный вестник № 6. Июнь 2015. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс]. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/778745.html> (дата обращения 07.10.2016).

2. **Моргунов Г. М., Купцов С. Ю., Рябцев Е. А.** Полирядные осевые насосы: особенности рабочего процесса и перспективы применения // Насосы и оборудование. 2015. № 4—5. С. 60—63.

Д.Р. Сверчков, студ.; рук. А.Д. Трухний, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДЕАЭРАЦИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ В ТЕПЛОВОЙ СХЕМЕ ПГУ

В конденсате, поступающем в котел-утилизатор ПГУ, всегда содержатся растворенные газы, в частности такие, как кислород и углекислота, вызывающие коррозию оборудования и трубопроводов. Термическая деаэрация позволяет удалять из воды любые растворенные газы и не вносит никаких дополнительных примесей в питательную воду.

В тепловых схемах ПГУ при использовании выделенного деаэратора, питаемого паром из контура НД параметры пара в барабане низкого давления (БНД) и деаэраторе становятся близкими [1]. В этом случае выгодно поместить деаэрационное устройство специальной конструкции прямо внутри БНД. Тогда в БНД будет происходить не только отделение пара от воды из пароводяной смеси, поступающей из испарителя, но и деаэрация конденсата, направляемого в контур высокого давления. При этом БНД одновременно будет выполнять функцию бака запаса деаэрированного конденсата для контуров среднего и высокого давлений. Расположение деаэратора в барабане НД позволяет исключить питательные электронасосы из схемы [2]. Преимуществом является использование для деаэрации греющего пара, генерируемого испарителем НД. При этом существенно упрощается тепловая схема и улучшается качество деаэрации. Опыт использования таких встроенных деаэрационных устройств показал, что при их нормальной работе содержание кислорода за деаэратором не превышает 10 мкг/кг.

В настоящее время такой метод деаэрации успешно применяется на многих действующих парогазовых энергоблоках. Преимущества этого метода подтверждаются опытом эксплуатации и надежностью конструкции.

Использование встроенных в БНД деаэрационных устройств проиллюстрировано в проекте двухконтурной ПГУ с использованием последней модификации ГТУ GT13E2 фирмы Альстом.

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 667 с.
2. **Рихтер Л.А.** Вспомогательное оборудование тепловых электростанций: учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 216 с.

Д.О. Сизов, студ.; рук. Д.А. Хохлов, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА СТЕРЛИТАМАКСКОЙ ТЭЦ

Одной из актуальных проблем на сегодняшний день является загрязнение атмосферного воздуха. Сжигание топлива на тепловых электрических станциях приводит к поступлению в атмосферу значительного количества вредных веществ: оксида серы, азота, углерода, полициклических ароматических углеводородов, пыли, сажи. Дальнейшее развитие теплоэнергетики во многом определяется именно экологическими требованиями и задача по снижению вредных выбросов при сжигании топлива актуальна как никогда.

Остро стоит проблема снижения выбросов оксидов азотов на энергетических котлах, по этой причине это является одним из основных требований при осуществлении реконструкции энергоблоков в РФ.

При проведении тепловых испытаний котла БКЗ-420 Стерлитамакской ТЭЦ было отмечено, что в некоторых режимах работы котла наблюдается неожиданно низкий уровень оксидов азота. Концентрация оксидов азота на номинальной нагрузке при эксплуатационном режиме сжигания природного газа (основного вида топлива) составляет 220—230 мг/м³ и удовлетворяет требованиям ГОСТ, предъявляемым к котлам, разработанным до 01.01.92 г. Исследованию работы газомазутной горелки этого котла, а также компоновки таких горелок в топке и посвящена данная работа.

Конструкция данного горелочного устройства отличается простотой, поэтому если удастся обеспечить его работу с надлежащими выбросами во всех необходимых режимах работы котла, этот опыт можно распространить на другие котлы и использовать его в ходе реконструкций, а также на ранних этапах проектирования новых котлов

Опыты с перераспределением расходов воздуха и газа по ярусам горелок и отключением двух горелок косвенно свидетельствуют об эффективности применения на котле схемы двухступенчатого сжигания с установкой сопел вторичного дутья для снижения выбросов NO_x.

В качестве основного инструмента для проводимых исследований было выбрано математическое моделирование с использованием CFD-методов. Данные методы позволят смоделировать процесс горения для данного горелочного устройства и определить значение вредных выбросов. В дальнейшем предполагается рассмотреть, на каких режимах работы котла и при какой компоновке горелок возможно получить минимальное значение выбросов оксида азота, удовлетворяющее ГОСТ Р 50831—95. Данный инструмент широко применяется при проведении подобных исследований.

*И.Ю. Сорокин, асп.; А.В. Тилинин, студ.;
рук. В.А. Тищенко, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ

Особенностью работы последних ступеней паровых турбин является наличие жидкой фазы в потоке пара. Ее присутствие является существенным негативным фактором, который приводит как к снижению экономичности в связи с появлением дополнительных потерь, так и к ухудшению надежности, из-за эрозионного разрушения рабочих лопаток ступени в периферийной области.

Актуальность проблемы эрозионного износа рабочих лопаток на данный момент стоит довольно остро. Существенное повышение экономичности и надежности решеток и ступеней в зоне влажного пара может быть достигнуто путем применения пассивных (применение эрозионно-устойчивых материалов, наплавки на входные кромки лопаток) и активных методов (внутриканальная сепарация пленки) борьбы [1]. Для того чтобы иметь возможность максимально эффективно разрабатывать методы, направленные на снижение пагубного влияния жидкой фазы, необходимо иметь представление о движении капель в межлопаточном канале сопловой решетки. Применение современных методов лазерной диагностики потоков позволяет по-новому рассмотреть механизм движения крупных капель в пределах соплового канала [2].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния числа Маха и отношения плотностей несущей и жидкой фазы на движение капель в межлопаточном канале плоской турбинной сопловой решетки. Для получения основных кинематических характеристик жидкой фазы использовалась система лазерной диагностики POLIS и метод обработки PTV.

В результате исследования были выявлены основные потоки капель, формирующиеся при обтекании профиля влажнопаровым потоком. Получены траектории для характерных потоков частиц. Построено распределение скоростей капель влаги вдоль траекторий.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 16-19-10484.

Литература

1. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат. 1996. 528 с.
2. **Разработка** методики применения лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсных влажнопаровых потоков / Г.А. Филиппов и др. // Известия РАН серия Энергетика. 2010. № 6. С. 11—20.

*П.А. Сухов, О.Н. Сладкова, М.Ю. Роганов, студенты;
рук. С.В. Хомяков, м.н.с. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДУВАЕМОГО ПАРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ЗА ИЗОЛИРОВАННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Проблема эрозионного износа рабочих поверхностей последних ступеней турбин, работающих в области влажного пара, до сих пор не решена и является одной из основных, стоящих перед производителями турбин высокой мощности. Негативное влияние крупных капель прежде всего выражается в разрушении профилированных поверхностей рабочих и сопловых лопаток. В результате чего снижается не только надежность, но и экономичность установки в целом.

Процессы эрозионного износа определяют величину предельной влажности за последней ступенью турбины [1]. Основным источником крупных эрозионно-опасных капель является пленка жидкости, которая образуется на поверхностях межлопаточного канала. Такой процесс характерен для течения пара в последних ступенях цилиндров низкого давления конденсационных машин и турбин атомных электростанций. Оседание капель на поверхностях проточной части в основном зависит от их диаметра и плотности несущей среды [2].

В работе представлены данные по расчетно-экспериментальному исследованию эффективности внутриканального вдува пара в проточных частях паровых турбин, работающих в условиях течения влажнопаровой среды. Задачей данного расчетно-экспериментального исследования являлось определение влияния температуры вдуваемого пара на скоростные характеристики жидкой фазы (коэффициенты скольжения, углы) за изолированной сопловой решеткой, а также на векторные поля крупных капель. Для этих целей использовалась система лазерной диагностики потоков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-03592.

Литература

1. **Филиппов Г.А., Коробков В.В.** Влияние эрозии лопаток на величину предельной влажности за последней ступенью // Теплоэнергетика. 1973. № 12. С. 14—18.
2. **Влияние** влажности на экономичность паровых турбин / Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, А.С. Лисянский// Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 96—107.

Д.А. Трохин, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ ТК-450-62 ДЛЯ АЭС

Как известно, ядерная энергия АЭС может быть использована не только для выработки электричества, но и для выработки тепловой энергии в виде отопления и горячего водоснабжения с помощью паровой турбины теплофикационного типа. Существуют разные режимы работы теплофикационных турбин. Одними из самых проблемных с точки зрения экономичности и надежности режимов работы турбины являются режимы с минимальным объемным пропуском пара в цилиндр низкого давления (ЦНД) [1].

Одной из важных задач при проектировании последних ступеней теплофикационных турбин на этапе их разработки или модернизации ЦНД является оценка вентиляционных потерь (ВП) мощности в них при работе на малорасходных режимах. Универсальная математическая зависимость для оценки ВП мощности Усачева—Неуймина позволяет наиболее достоверно найти величину потерь. Данная зависимость обеспечивает среднеквадратичную погрешность не выше 3 % и позволяет учесть практически все многообразие параметров: геометрические характеристики рабочего колеса, радиальный зазор размеры камеры вентилирования, частоту вращения рабочего колеса, плотность среды, определяющих уровень ВП в ступени турбины [2].

Расчетное исследование вентиляционного процесса, сопровождающего режимы работы теплофикационной турбины ТК-450-62 с малыми объемными расходами рабочего пара в ЦНД, позволило получить наиболее корректное значение вентиляционных потерь (ВП) мощности.

В результате проведенных расчетов определена величина мощности вентиляционных потерь в установившемся вентиляционном режиме в обеспаренном ЦНД в последней ступени турбины при давлении в конденсаторе 9,8 кПа и плотности пара 0,067 кг/м³. При определении потерь мощности были найдены коэффициенты, учитывающие геометрические и аэродинамические характеристики ступени. Величина вентиляционных потерь составила 1591 кВт, а конструктивная функция вентиляции разработанной рабочей лопатки — 17,28.

Литература

1. **Трухний А.Д., Ломакин Б.В.** Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2002. 540 с.
2. **Неуймин В.М.** Методы оценки вентиляционных потерь мощности в ступенях паровых турбин ТЭС // Теплоэнергетика. 2014. № 10. С. 73—80.

Е.А. Тюшкина, А.А. Гусев, аспиранты;
рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

БЕЗДЕАЭРАТОРНАЯ СХЕМА ТПУ ТИПА Т-100-130 ПАО «МОСЭНЕРГО»

Бездеаэрационные тепловые схемы (БТС) широко применяются за рубежом, но только на энергоблоках большой мощности. На сегодняшний день отсутствует однозначное мнение по поводу отказа от деаэратора в схемах теплофикационных турбоустановок.

Среди положительных моментов применения БТС следует отметить существенное сокращение объема ремонтных работ при ликвидации деаэрационной установки, части трубопроводов и арматуры.

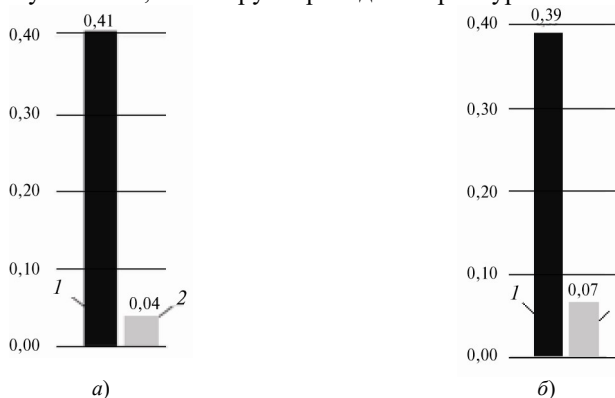


Рис. 1. Прирост КПД брутто (%) (а) и электрической мощности (%) (б) ТПУ Т-100-130 бездеаэрационной схемой: 1 — конденсационный режим; 2 — теплофикационный режим

Следует учитывать, что деаэраатор требует постоянного внимания при эксплуатации, а также периодических проверок состояния сварных швов на корпусе, предохранительных клапанов, регуляторов и трубопроводов, поскольку он относится к сосудам, подведомственным «Ростехнадзору».

Применение БТС, являясь перспективным решением, требует дополнительного технико-экономического обоснования при применении в ТПУ на докритические параметры пара, работающие с поперечными связями.

В настоящей работе была просчитана бездеаэрационная тепловая схема ТПУ Т-100-130 в конденсационном и теплофикационном режимах.

Как видно из рис. 1, применение бездеаэрационной схемы приводит к заметному выигрышу только на конденсационном режиме, а на теплофикационном режиме этот выигрыш ничтожно мал.

*А.Р. Хаертдинова, М.М. Салимханов, студенты;
рук. А.С. Шубина, доц. (КГЭУ, г. Казань)*

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Многообразие потребителей энергии, различные требования к виду и качеству энергообеспечения заставляют по-новому взглянуть на роль энергетических установок малой мощности (от десятков киловатт до нескольких мегаватт) в общей структуре энергетической отрасли.

Серьезное внимание уделяется сооружению относительно дешевых автономных энергетических установок малой мощности различного назначения, финансирование которых возможно как из местных бюджетов, так и за счет инвестиций [1].

Принципиально в теплоэнергетических установках могут быть использованы различные типы изделий, выпускаемые промышленностью: двигатели внутреннего сгорания, паровые, газовые турбины или их комбинации.

Одним из потребителей энергии являются независимые малые нефтяные компании. При этом утилизация попутного нефтяного газа является острой проблемой всех нефтяных компаний.

В настоящее время попутный нефтяной газ в огромных количествах сжигается на факелах. Создание автономных установок, использующих попутный нефтяной газ, позволит решить проблему тепло- и электроснабжения. Для выработки электроэнергии для промышленных нужд, с применением энергосберегающих технологий на базе автономных установок малой мощности используют попутный нефтяной газ.

Существует проблема эксплуатации микротурбинных энергетических установок в связи с дорогостоящей предварительной подготовкой попутного газа для использования его в качестве топлива. Все эти обстоятельства препятствуют переходу от опытной установки к промышленному развитию.

Решением данной проблемы является создание автономной энергетической установки. Эта энергетическая установка ориентирована на широкую гамму топлив: жидкое, газообразное, отходы лесной и сельскохозяйственной промышленности, биогаз, продукты переработки бытовых отходов, продукты подземной или промышленной газификации твердых топлив, отходов нефтедобычи и нефтепереработки.

Литература

1. НТЦ «Микротурбинные технологии». Обзор и состояние развития современных газотурбинных установок малой мощности. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://stc-mtt.ru>

*Н.А. Хильков, А.Д. Пахилова, А.И. Юняткин, студенты;
рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭНЕРГОБЛОК МОЩНОСТЬЮ 300 МВт С СЖИГАНИЕМ CH_4 В СРЕДЕ ВОДЯНОГО ПАРА

В настоящее время наблюдается тенденция повышения экономичности энергоблоков за счет увеличения эффективности паровых турбин и увеличением параметров пара до 30-35 МПа и 600-650 °С. В Европе реализуется межгосударственная программа «Терми» создания уже в ближайшее десятилетие угольных энергоблоков на начальную температуру 720 °С с КПД 55% [1].

В связи с этим рассматривается возможность создания высокотемпературного энергоблока (со сжиганием CH_4 в среде водяного пара) с ультра-сверхкритическими параметрами пара, основанная на вариантных расчетах принципиальной тепловой схемы и проработках проточной части газопаровой турбины.

Проведенные расчеты тепловой схемы установки с газопаровой турбиной, работающей на полученной смеси водяного пара и CO_2 , показали прирост абсолютного внутреннего КПД и необходимость ее проектирования на повышенную начальную температуру и температуру промежуточного перегрева с целью возможности поддержания за последними ступенями глубокого вакуума.

Очевидно, что для создания высокотемпературных газопаровых турбины и энергоблоков на их базе необходимы новые идеи и нетрадиционные подходы. И эта задача на порядок сложнее, чем создание ГТУ на аналогичную температуру, так как она требует весьма трудной увязки газопаропроизводящей установки, газопаровой турбины и специфического вспомогательного оборудования, создание каждого из которых является отдельной серьезной задачей.

Полученный прирост экономичности рассматриваемого энергоблока объясняется не только повышением начальных параметров рабочего тела, но и отсутствием потерь от влажности в части низкого давления, так как весь процесс расширения лежит в области перегретого рабочего тела.

В результате разработки концепции газопаровой турбины мощностью 300 МВт показано, что ее можно выполнить состоящей из двух цилиндров – одного ЦВД и одного совмещенного ЦСНД с рабочей лопаткой последней ступени с высотой рабочей лопатки 1350 мм и корневым диаметром 1,6 м (ЦВДх1х20+ЦСНДх1х17).

Литература

1. **Rosenkranz J., Wichtmann A.** Balancing economics and environmental friendliness – the challenge for supercritical coal – fired power plants with highest steam parameters in the future. Siemens A.G. 2005.

Е.В. Цымбалов, А.С. Никулин, студенты;
рук. В.И. Голубев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ СТЕНДОМ

Использование программируемых логических контроллеров (ПЛК) позволяет значительно сократить затрачиваемое время и точность эксперимента за счет автоматизации снятия показаний и построения экспериментальных характеристик.

В данной работе было рассмотрено использование ПЛК фирмы Siemens Simatic S7-300 на примере исследования электрогидравлических устройств систем управления, а именно электрогидравлического распределителя с пропорциональным электромагнитным управлением. На рис. 1 представлена электрогидравлическая схема экспериментального стенда на базе гидравлического оборудования фирмы Festo для получения расходных характеристик исследуемого объекта.



Рис. 1. Электрогидравлическая схема экспериментального стенда

TIA Portal-интегрированная среда разработки программного обеспечения систем автоматизации технологических процессов от уровня приводов и контроллеров до уровня человеко-машинного интерфейса. В данной среде была реализована программа автоматизации снятия и визуализации расходных характеристик пропорционального распределителя.

Работы по данной теме продолжаются в направлении автоматизации экспериментальных исследований более сложных систем управления технических объектов.

М.А. Черкасов, И.П. Лавырев, студенты; С.К. Осипов, асп.;
рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА ПРЕДЕЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ ТРЕХЦИЛИНДРОВОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Актуальность представленного исследования в том, что выделен тот круг начальных параметров пара, при которых возможно создание мощных и сверхмощных турбин при минимальной металлоемкости этих блоков.

Массовый расход пара G_{z1} через последнюю ступень цилиндра низкого давления (ЦНД) однопоточной конденсационной турбины определяется следующими соотношениями

$$G_{z1} = \frac{c_{za} F_z}{V_z} = \frac{M_{za}^* a_z F_z}{V_z}. \quad (1)$$

Здесь M_{za}^* — предельно допустимое значение числа Маха, при котором еще нет «запирания» выхлопного патрубка; a_z — скорость звука за последней ступенью; F_z — торцевая площадь последней ступени; V_z — удельный объем.

Известно, что

$$\frac{M_{za}^* a_z F_z}{V_z} \cong f(P_z) = a + bP_z \quad (2)$$

и для $M_{za}^* = 0,65$

$$G_{z1} = (0,14 + 192,7P_z)F_z. \quad (3)$$

Здесь P_z — давление пара за последней ступенью ЦНД.

Используя зависимости (1)—(3), при длине лопаток последних ступеней ЦНД конденсационных турбин $l = 1200$ мм, среднем диаметре $D_z = 3000$ мм и давлении $P_z = 0,035$ бар получим максимальный расход пара $G_{z1}^{\max} = 77,8$ кг/с.

Для двухпоточного ЦНД $G_{z2}^{\max} = 2G_{z1}^{\max} = 155,6$ кг/с.

Тогда, максимальный расход свежего пара, подводимого к турбине будет равен

$$G_0^{\max} = \frac{G_{z2}^{\max}}{1 - \sum \alpha_i}.$$

Здесь α_i — коэффициент расхода пара в систему регенеративного подогрева пара.

Проведенные далее расчеты тепловых схем ПТУ при различных начальных параметрах пара позволили получить зависимости предельных мощностей паротурбинных блоков от этих параметров при использовании только одного двухъярусного ЦНД. Показано, что в этом случае при давлении свежего пара $P_0 > 30$ МПа и температуре $t_0 > 650$ °С предельная мощность трехцилиндровой турбины составит 800 МВт.

А.С. Яшкин, студ.; рук. А.Е. Булкин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УЧАСТИЕ ГТЭ-160 В СОСТАВЕ ПГУ-450 В ПЕРВИЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ

Газотурбинная установка (ГТУ) в парогазовой установке (ПГУ) утилизационного типа является активным элементом, определяющим режим работы котла-утилизатора и паровой турбины .

В рабочем диапазоне нагрузок газовых турбин в составе ПГУ утилизационного типа температура газов на выходе из ГТУ сохраняется постоянной, что обеспечивается оперативным поддержанием оптимального соотношения газ-воздух совместным изменением расхода топлива и угла поворота входного направляющего аппарата (ВНА). Поэтому одной из важных задач настоящей работы было

нахождение зависимости «положение ВНА – обобщенное задание на топливные регулирующие клапаны» [1].

Для участия газовой турбины (ГТ) в общем первичном регулировании частоты электрического тока системой автоматического регулирования частоты и мощности (САРЧМ) энергоблока ПГУ-450 должен быть обеспечен достаточный темп изменения мощности ГТ в регулировочном диапазоне при

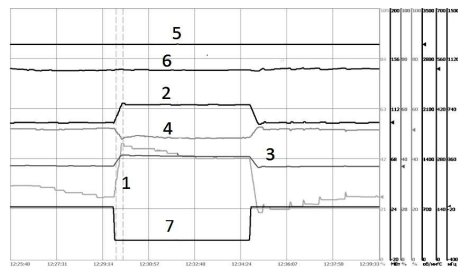


Рис. 1. Работа частотного корректора ГТЭ-160: 1 — положение ВНА; 2 — активная мощность; 3 — положение регулятора клапана газа; 4 — положение регулятора клапана пилотного газа; 5 — частота вращения; 6 — активный температурный корректор ГТ; 7 — задатчик теста ЧК

положениях ВНА от 0 % до 100 % его открытия [2]. Важным элементом САРЧМ является частотный корректор (ЧК) ГТЭ-160 (рис. 1).

Целью исследования являлась настройка регуляторов ГТ и внесение корректировок в прикладное программное обеспечение системы автоматического регулирования ГТ, что позволило добиться:

- изменения мощности под воздействием частотного корректора со скоростью до 90 МВт/мин;
- готовности участия в общем первичном регулировании частоты во всем регулировочном диапазоне в соответствии с действующими нормативными документами.

Литература

1. Костюк А.Г. Газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1979.
2. Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок. М.: Издательский дом МЭИ. 2009.

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ, НАДЕЖНОСТИ И КОНСТРУИРОВАНИЯ

*Председатель секции — к.т.н., доцент С.Ф. Кузнецов
Секретарь секции — магистрант В.Н. Зеликов*

*П.А. Володин, О.В. Володина, студенты;
рук. Г.Х. Мурзаханов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ОТ УРОВНЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для предотвращения лавинных разрушений трубопроводов большое внимание уделяется изучению деформационных характеристик стали: относительного удлинения, относительного сужения; ударной вязкости; вязкости разрушения. Установлено [1], что между ними существуют корреляционные зависимости, которые могут быть выражены аналитически.

В докладе на основе анализа экспериментальных данных [1] предложена математическая модель, позволяющая с достаточной для инженерных расчетов точностью определять зависимость ударной вязкости материала от уровня предварительной пластической деформации. По результатам проведенных расчетов для трубной стали класса прочности X70 показано, что максимальное значение ударной вязкости при уровне предварительной пластической деформации менее 3,2 % равно 125,74 Дж/см² (экспериментально определяемое значение ударной вязкости стали X70 лежит в пределах 124 – 144 Дж/см² [2]). Минимальное значение достигается при значениях пластической деформации, превышающей 10 % и составляет 17,48 Дж/см², то есть при исчерпании запаса пластичности ударная вязкость сталей класса прочности X70 уменьшается более чем в 7 раз, а вязкость разрушения, соответственно, в 2,6 раза, что согласуется с данными работы [3] где отношение максимального значения коэффициента интенсивности напряжений к вязкости разрушения для различных металлов лежит в интервале от 2 до 3.

В докладе приведены результаты, свидетельствующие о возможности существенного сокращения объема экспериментальных работ при исследовании деформационных характеристик трубных сталей класса прочности X70 с относительным удлинением не более 25 %, а также обоснованного назначения ограничений на допустимый уровень пластических деформаций материала конструкции на этапах изготовления, строительства и эксплуатации.

Литература

1. **ОСТ-23.040.00-КТН-574-06.** Стандарт отрасли. Нефтепроводы магистральные. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами. ОАО АК «Транснефть». Москва, 2006.
2. **Матросов Ю.Д., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А.** Сталь для магистральных газопроводов. М.: Металлургия, 1989.
3. **Черепанов Г.П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.

П.А. Володин, О.В. Володина, студенты;
рук. В.Н. Щугорев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ И МОДИФИКАЦИЯ ПОПРАВОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДИАГРАММ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛАСТИН КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ С ЦЕНТРАЛЬНОЙ СКВОЗНОЙ ТРЕЩИНОЙ

В докладе на основе решения задачи об одноосном растяжении пластины конечных размеров с центральной сквозной трещиной, полученного в [1] с использованием моделей Е.М. Морозова и Д.С. Дагдейла [2], предложен вариант модифицированной поправочной функции, позволяющий проводить корректные расчеты остаточной прочности пластины по традиционному критерию Дж.Р. Ирвина во всем диапазоне длин трещины.

Основным отличием модифицированной поправочной функции от применяемых ранее является ее особенность при нулевой длине трещины, что обеспечивает ограниченное значение расчетной прочности пластины при стремлении длины трещины к нулю. Кроме того, предложенная модифицированная поправочная функция зависит не только от относительной длины трещины, но и от механических характеристик материала пластины.

Показано, что из решения, полученного с использованием предложенной поправочной функции для достаточно широких пластин изготовленных из хрупких материалов, следует известное решение задачи А.А. Гриффитса в упругой постановке.

Таким образом, предложенный вариант модифицированной поправочной функции в задаче об одноосном растяжении пластины с центральной сквозной трещиной позволяет расширить область применения силового критерия Дж.Р. Ирвина на весь диапазон длин трещин, включая нулевые. Кроме того, явная зависимость модифицированной поправочной функции от механических свойств пластины при разрушении позволяет использовать критерий Дж.Р. Ирвина для расчета диаграмм остаточной прочности пластин не только при квазихрупком, но и вязком разрушении.

Литература

1. **Обобщение** решений задачи Гриффитса на случай расчета пластин конечных размеров / О.В. Володина, В.М. Силкин, В.П. Столов, В.Н. Щугорев // Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Т.2. М.: ТРИ, 2016.

2. **Партон В.З., Морозов Е.М.** Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука, 1974.

М.В. Вруцкий, студ.; рук. А.Ю. Марченков, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ

Определение твердости покрытий, тонких обработанных слоев материалов и других объектов малой толщины вдавливанием индентора имеет свои особенности. Для корректного определения их твердости необходимо обеспечить такие условия испытания, при которых подложка покрытия или предметный столик прибора не оказывают влияния на результат измерения. Согласно нормативным документам, регламентирующим условия определения твердости вдавливанием индентора, толщина контролируемого объекта H должна быть не менее чем в 8...10 раз больше, чем глубина получаемого на нем отпечатка t . Однако иногда обеспечить такие условия при определении твердости невозможно (как правило, в случае очень малых толщин контролируемых объектов). В связи с этим существует потребность в методике, позволяющей определять твердость покрытий в том случае, если условие, касающееся выдержки требуемого соотношения H/t , не выполняется.

В настоящем докладе представлены результаты определения твердости упрочняющих покрытий на основе TiN, нанесенных на подложку из углеродистой стали, с использованием методик и формул, представленных в различных литературных источниках [1—3]. Автор принимал участие в проведении экспериментальных исследований, а также в последующем анализе их результатов. Было установлено, что для исследуемых покрытий на основе TiN наиболее точной является методика расчета твердости Джонсона-Хогмарка [1] для случая индентирования хрупкого покрытия на пластичной подложке (разность между значениями твердости покрытий, определенными в данной работе экспериментально, и расчетными значениями твердости по методике Джонсона-Хогмарка, не превышает 5%). Полученные выводы позволяют использовать эту методику для определения твердости упрочняющих покрытий независимо от их толщины и отношения H/t , что в свою очередь существенно расширяет диапазон толщин покрытий, доступный для контроля твердости.

Литература

1. **Jonsson B.**, Hogmark S. Hardness measurements of thin films // Thin solid films. 1984. Vol. 114. No. 3.
2. **On the hardness** of coated systems / A.M. Korsunsky, M.R. McGurk, S.J. Bull, T.F. Page // Surface and Coatings Technology. 1998. Vol. 99. No. 1—2.
3. **Saha R.**, Nix **W.D.** Effects of the substrate on the determination of thin film mechanical properties by nanoindentation // Acta Materialia. 2002. Vol. 50. No. 1.

А.С. Дёмина, Д.Р. Сверчков, студенты;
рук. В.Е. Хроматов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Тонкостенные пластины и оболочки являются весьма распространенными конструктивными элементами электрических машин и аппаратов, МГД-генераторов, работающих в условиях воздействия магнитных полей [1,2]. При проектировании и расчетах этих элементов на прочность, колебания и устойчивость необходимо учитывать влияние магнитных полей на их прочностные и жесткостные характеристики.

В работе рассматривается прямоугольная пластина, изготовленная из магнитомягкого ферромагнитного материала, нагруженная переменными продольными силами и помещенная в постоянное продольное магнитное поле. Получены соотношения для определения областей устойчивости ферромагнитных пластин, находящихся в магнитном поле. Проведено исследование параметрических магнитоупругих колебаний. Определены границы главной области неустойчивости [3]. В случае диэлектрического ферромагнитного материала магнитное поле может в несколько раз увеличить ширину главной области динамической неустойчивости. В случае идеально проводящей пластины магнитное поле уменьшает ширину главной области динамической неустойчивости. Магнитные поля оказывают эффект, аналогичный влиянию сжимающих сил в срединной плоскости пластины.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и расчете динамических характеристик тонкостенных элементов конструкций в магнитных полях.

Литература

1. Голубева Т.Н. Динамическая устойчивость ферромагнитных пластин в поперечном магнитном поле // Инженерный журнал. 2013. № 5.
2. Голубева Т. Н., Демина А.С., Сверчков Д.Р. Колебания и устойчивость контактных сердечников герконов из ферромагнитного материала в магнитном поле.// Материалы XXVI международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов «МИКМУС-2014» 17—19 декабря 2014 г. М.: Изд-во ИМАШ РАН. 2014.
3. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. М.: Гостехиздат, 1956.

М.А. Залознова, студ.; рук. Е.В. Позняк, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ХВОСТОВАЯ БАЛКА – ХВОСТОВОЕ ОПЕРЕНИЕ ВЕРТОЛЕТА

Расчет параметров собственных колебаний — важный начальный этап вибрационного исследования конструкции.

Цель работы заключается в определении амплитудно-частотных характеристик [1] математической модели системы хвостовая балка — хвостовое оперение вертолета и верификации полученных результатов по результатам сравнения с данными частотных испытаний натурной конструкции.

На основе трехмерной модели системы, выполненной в среде CATIA, построена геометрическая оболочечная модель, моделирующая силовую схему конструкции. Основным программным обеспечением для конечно-элементного (КЭ) анализа служит комплекс MSCPatran/Nastran [2].

Создание адекватной КЭ модели конструкции достигнуто путем подбора типов конечных элементов и методов построения КЭ сеток. Использовались оболочечные элементы (типы QUAD и TRIA) для моделирования поясов, стенок основных несущих элементов (лонжеронов и нервюр), а также несущей обшивки. Для моделирования силовых элементов (продольные и поперечные профили) использовались балочные элементы (тип BEAM). При построении КЭ сеток применялись IsoMesh и PaverMesh методы. Оболочки, пластины и балки соединялись между собой по узлам конечных элементов.

Задача решалась в линейно-упругой постановке, при этом:

- металлические детали представлялись как однородные изотропные линейно-упругие тела,

- композиционные элементы [3] моделировались многослойным конечным элементом типа LAMINATE (наружные несущие слои представлялись пакетами однородных анизотропных упругих монослоев, а сотовый наполнитель — однородным ортотропным упругим телом).

Разработанная модель может быть использована для статического и динамического расчетов хвостовой части вертолета.

Литература

1. **Биргер И.А.** Прочность, устойчивость, колебания: Справочник. М.: Машиностроение, 1968. Т. 3.

2. **Шимкович Д.Г.** Femap&Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2008.

3. **Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М.** Композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА СДВИГОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ В НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПЕРЕКРЫТИЙ

В отечественной научной литературе и конструкторской документации термин «эффект сдвигового запаздывания» широкого распространения не получил, при этом он часто встречается в зарубежных источниках.

Согласно классической балочной теории, распределение нормальных напряжений постоянно по всей ширине полки (пояса). Однако расчет изгиба балки с широкими поясами как подкрепленной плиты показывает, что гипотеза плоских сечений не выполняется на достаточно протяженных участках. Распределение напряжений (σ_x) в полке на таких участках нелинейное, а максимальное значение (σ_{\max}) достигается в точках, расположенных непосредственно над ребром балки (рис. 1). Это явление постепенного включения пояса в работу сечения балки получило название «эффект сдвигового запаздывания». Таким образом, расчеты балок с широкими полками нельзя проводить в соответствии с элементарной теорией изгиба. Задачи такого рода решаются путем уменьшения расчетной ширины полки (b_0) до эффективной (b_{eff}) [1].

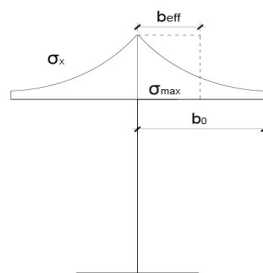


Рис. 1. Распределение напряжений по ширине полки

В несущих конструкциях перекрытий эффект сдвигового запаздывания следует учитывать при расчете плит с ребрами по балочной модели. Такое упрощение необходимо как для расчета армирования, поскольку наиболее детально этот процесс проработан именно для балок как и для облегчения вычислений, так как оно позволяет использовать «ручные» методы.

В работе выполнены сравнительные расчеты различных конструкций по методу конечных элементов и по балочной схеме в соответствии с отечественными и зарубежными правилами. Даны рекомендации по определению эффективных размеров несущих конструкций, так как подходы к их вычислению неодинаковы в различных нормах. Исследование показало, что в отечественный свод правил [2] необходимо внести изменения, связанные с учетом эффекта сдвигового запаздывания.

Литература

1. EN 1994-1-1. «Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings», 2004.
2. СП 63.13330.2012. «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», 2012.

В.Н. Зеликов, Е.П. Минчакова, студенты;
рук. С.Ф. Кузнецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ К ВОЗМУЩЕНИЯМ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Проблема чувствительности конструкций к отклонениям параметров воздействий от расчетных значений является актуальной для систем с многокомпонентными схемами нагружения. Предлагается метод качественной оценки чувствительности линейных расчетных моделей механики конструкций по отношению к возмущениям параметров, определяющим внешние воздействия. Решение линейных задач механики конструкций рассматривается как результат однозначного отображения элементов F некоторого n -мерного векторного пространства входной информации (параметры нагрузок и воздействий) на элементы Rm -мерного пространства выходной информации (характеристики геометрических изменений и внутренних сил), осуществляемого линейным алгебраическим оператором A (матрица коэффициентов влияния размерности $m \times n$). Чувствительность модели характеризуется сопоставлением норм векторов относительных отклонений входной (ε_F) и выходной (ε_R) информации посредством коэффициента $\rho = \varepsilon_R / \varepsilon_F$.

Показано, что величина коэффициента чувствительности ρ определяется свойствами матрицы оператора A и может существенно варьироваться в зависимости от конфигурации входной информации и корреспондируемых ей возмущений. Для случая матриц полного ранга при $m = n$, $m > n$ и $m < n$ получены строгие двусторонние оценки коэффициента чувствительности в среднеквадратических нормах при произвольных возмущениях входных параметров и определены элементы входного пространства, соответствующие этим предельным значениям. Для случая $m < n$ верхняя оценка коэффициента чувствительности получена с использованием сингулярного разложения матрицы оператора A [1] в асимптотической форме, что обусловлено существованием 0-подпространства матрицы.

Проведен детальный анализ чувствительности некоторых широко используемых балочных моделей в стандартной процедуре расчета «по сечениям» при различных типах статического и динамического нагружения. Показано, что предложенный метод может использоваться в расчетной практике для оценки чувствительности сложных конструкций по отношению к отклонениям параметров воздействий.

Литература

1. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980.

С.И. Коломенский, студ.; рук. Е.В. Позняк, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ МОДЕЛИ КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА

Угловые движения грунта при землетрясениях являются одной из причин обрушения высотных зданий; вследствие поворота плоскости фундамента здание подвергается раскачиванию (особенно при длинах сейсмических волн, соизмеримых с размерами фундамента), что может привести к потере устойчивости конструкции и разрушению несущих элементов. Влияние, оказываемое ротационными составляющими сейсмического воздействия на перемещения конструкции, при определенных условиях может быть существенным и требовать учета при анализе сейсмической реакции.

Для описания движения грунта во время землетрясения применяется интегральная дилатационно-ротационная модель [1] сейсмического воздействия. Она предусматривает как поступательные, так и угловые движения грунтового основания. Расчет ротационных компонент осуществляется с использованием обобщенной волновой модели по методике, предложенной Ю.П. Назаровым в трудах [2], [3].

Создание модели каркасного здания и проведение численного анализа ее сейсмической реакции с учетом угловых движений грунта выполняется с использованием программного вычислительного комплекса STARK ES 2016. В качестве входного сейсмического воздействия приняты трех- и шестикомпонентные акселерограммы, анализируемые в ПК MATLAB. Динамический анализ включает расчет перемещений модели во временной области и сравнение двух случаев сейсмического воздействия: с ротациями и без них. Перспективы использования результатов важны для развития численных методов анализа сейсмической реакции строительных конструкций с учетом угловых движений грунта.

Литература

1. Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий. М.: Наука, 2012.
2. Назаров Ю.П., Позняк Е.В., Филимонов А.В. Анализ вида волновой модели и получение расчетных параметров сейсмического воздействия для высотного здания // ПГС. 2014. № 5.
3. Назаров Ю.П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия. М.: Наука, 2010.

А.В. Крысов, студ.; рук. А.М. Дроконов, к.т.н., проф. (БГТУ, г. Брянск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТАХ С СУДОВЫМ ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ

Основу современного технического прогресса составляет постоянное наращивание производительности. Модернизация энергоблоков, как правило, приводит к снижению металлоемкости агрегатов, что в условиях повышения параметров теплоносителей и развиваемых мощностей вызывает рост виброактивности элементов установок и, как следствие, повышение интенсивности излучаемой акустической мощности.

С целью систематизации и накопления материалов по изучению виброакустических характеристик турбоустановок были выполнены исследования, широко используемые на компрессорных станциях магистральных газопроводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с судовым газотурбинным приводом. Объектом изучения служила установка типа ГПА-16МГ мощностью 16МВт.

Вибропараметры регистрировались в трех точках корпуса турбоустановки, опорном и опорно-упорном подшипниках силовой турбины (СТ), а также на опорно-упорном подшипнике нагнетателя. По результатам исследований были построены шумодиаграммы ГПА-16МГ, спектры шума, графики вибропараметров и предложены методы снижения виброакустической активности.

Проведенные автором анализ и обработка результатов исследований вибрационных и акустических характеристик установки типа ГПА-16МГ свидетельствуют о необходимости разработки мероприятий по снижению вибрационного состояния СТ, опорно-упорного подшипника нагнетателя посредством технической модернизации, уменьшения уровней звукового давления до санитарных норм [1].

Сведения об активных и пассивных методах снижения виброактивности приведены в [1].

Литература

1. **Акустические** характеристики газотурбинных газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов / А.А. Апостолов, И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов, Н.В. Дашунин. Брянск: БГТУ, 2002.

П.А. Кудинов, студ.; рук. В.П. Радин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ НАГРУЗКИ

С развитием авиации, машиностроения, ракетной техники класс нагрузок увеличивается. Появляются такие нагрузки, как: реактивные силы тяги, электромагнитные, аэродинамические и другие силы. Если совершаемая работа нагрузок по замкнутому пути отлична от нуля, то такие силы называют неконсервативными.

В данной работе исследуется на устойчивость прямолинейная форма равновесия стержня при действии неконсервативной нагрузки. Устойчивость консольного стержня при действии распределенной сжимающей нагрузки относится к классическим задачам теории упругой устойчивости [1]. К следящей нагрузке добавлена распределенная сжимающая нагрузка постоянного направления. Целью данной работы является исследование устойчивости стержня при сложном нагружении (рис. 1) для выявления и построения границ области устойчивости. Исследование и построение границ области устойчивости проводится двумя методами: метод разложения решения возмущенного движения в ряд по собственным формам колебаний с дальнейшим применением метода Бубнова — Галеркина и метод конечных элементов [2]. Для различных значений параметров демпфирования построены границы областей устойчивости.

Сравнение результатов, полученных различными методами, показали хорошее совпадение даже для небольшого числа членов в разложении в ряд по собственным формам колебаний и небольшого числа элементов, на которые разбивается исходная схема. Подобный сравнительный анализ ранее не проводился. Он показал, что для расчета устойчивости сложных механических систем, находящихся в условиях неконсервативного нагружения, целесообразно использовать метод конечных элементов.

Литература

1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961.
2. Радин В.П., Щугорев А.В. Методы исследования устойчивости неконсервативных механических систем: Учебное пособие под ред. В.П. Чиркова. М.: Издательство МЭИ, 2010.

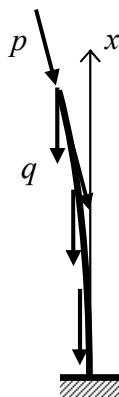


Рис. 1. Консольный стержень при действии следящей силы P и распределенной нагрузки q

Н.А. Стасенко, студ.; рук. В.М. Матюнин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СОПРОТИВЛЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

Нанесение упрочняющих покрытий на детали и конструкции, работающие в условиях повышенных контактных нагрузок и износа, является эффективным способом увеличения ресурса их эксплуатации. Оценка качества нанесенных покрытий выполняется по многим параметрам, среди которых важное место занимает трещиностойкость. Повышенный интерес технологов, металлургов и прочнистов к трещиностойкости объясняется тем, что от этого параметра зависит конструкционная прочность всего изделия, на которое нанесено покрытие. Обычно при разработке новых составов упрочняющих покрытий и технологий их нанесения стремятся увеличить твердость. Однако с увеличением твердости запас пластичности, как правило, уменьшается, что может привести к хрупкости и снижению трещиностойкости покрытия. Наиболее эффективным методом механических испытаний, позволяющим оценить трещиностойкость покрытий, является метод индентирования, а одной из основных характеристик трещиностойкости — критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} . Известны формулы для расчета K_{Ic} по параметрам индентирования алмазной пирамидой для высокотвердых и хрупких материалов, у которых образуются радиальные трещины [1].

Однако при индентировании некоторых упрочняющих покрытий, например из TiN, вокруг отпечатка образуются не радиальные, а кольцевые трещины. В этом случае известные формулы неприменимы. В настоящей работе авторами предложена методика определения удельной работы упругопластической деформации $\omega_{кр}$, которая необходима для образования первой трещины. Основой методики служит кинетическое индентирование с регистрацией диаграммы деформирования «нагрузка F –глубина внедрения индентора t ». По значениям $F_{кр}$ и $t_{кр}$, соответствующим первому перелому на линии нагружения диаграммы, определяется $\omega_{кр}$, которая характеризует трещиностойкость покрытия независимо от вида образующихся трещин. Эксперименты проводились при непосредственном участии автора. Полученные результаты могут быть полезны при выполнении работ по сравнению трещиностойкости различных упрочняющих покрытий.

Литература

1. Evans A.G., Charles E.A. Fracture toughness determinations by indentation // Journal of American ceramics society. 1976. Vol. 58. Issue 7—8.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОГО РОТОРА ТУРБОМАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА КВАЗИДИАГОНАЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Учет влияния гироскопического эффекта актуален во многих областях машиностроения. Исключение из расчета колебаний гироскопических сил может привести к незапланированным простоям турбомашин из-за превышения нормативных значений вибрации, что в свою очередь приводит к большим экономическим потерям. Большую роль в снижении уровня вибрации играют системы вибрационной диагностики, снабженные математическими моделями, основанными на достоверных методиках и реальных данных о роторе, возмущающих силах, опорах, небалансе.

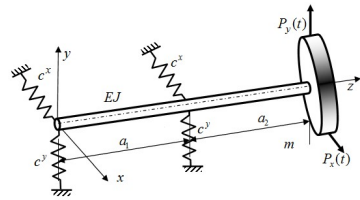


Рис. 1. Консольный ротор на двух анизотропных опорах

Новизна данной работы заключается в том, что с помощью метода квазидиагонализации [1] проводится исследование установившихся колебаний консольного ротора с учетом гироскопического эффекта. Предложена математическая модель консольного ротора на двух анизотропных опорах (рис. 1), учитывающая гироскопический эффект (масса диска m , расстояние между опорами a_1 , длина консоли a_2 , изгибная жесткость сечения вала EJ , коэффициенты жесткости подшипников c^x, c^y , законы движения $P_x(t)$ и $P_y(t)$).

Все представленные в работе результаты получены либо лично авторами, либо при их непосредственном участии.

Используя метод квазидиагонализации [1], получаем, что при наборе числа оборотов происходит увеличение резонансной области тем больше, чем больше влияние гироскопического эффекта. И наоборот, при снижении числа оборотов – резонансная область уменьшается.

Используемый в работе подход позволяет достаточно просто производить анализ вибрации роторных машин и оценить влияние на них различных эксплуатационных и конструктивных факторов. Знание подобных закономерностей позволяет сократить сроки проектирования и производить машины с низким уровнем вибрации и высокой эксплуатационной надежностью.

Литература

1. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. МКЭ в динамических задачах сопротивления материалов. М.: Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2013.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — зав. каф. РМДиПМ, д.т.н., профессор И.В. Меркурьев

Секретарь секции — к.ф.-м.н., доцент Г.В. Панкратьева

Е.А. Антонов, асп.; рук. В.В. Подалков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ДИНАМИКУ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА $L-L$ ТИПА В РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В настоящее время микросистемные приборы широко используются во всех сферах нашей жизни, начиная от игрушек и заканчивая навигационными системами военных и космических объектов [1]. В связи с этим микромеханические гироскопы имеют обширный спектр применения, и поэтому исследование ММГ является на сегодняшний день актуальной и востребованной задачей.

Данная работа продолжает исследования, результаты которых приведены в работе [2]. Рассматривается задача динамики микромеханического гироскопа $L-L$ типа в режиме вынужденных колебаний при наличии в системе нелинейных деформаций [3,4] и медленно меняющегося параметра. Учтено медленное изменение частоты гармонического возбуждения, вызванного вибрацией основания. Получены амплитудно-частотные характеристики, проведен их анализ. Построенные АЧХ характерны и для других типов микромеханических гироскопов [5], что подтверждает достоверность полученного результата. Сделаны соответствующие выводы по динамике чувствительного элемента.

Новизна проведенной работы заключается в том, что определено влияние нелинейных деформаций и медленно меняющегося параметра на динамику микромеханического гироскопа $L-L$ типа в режиме вынужденных колебаний. Численным моделированием установлено, что нелинейные эффекты и медленное изменение частоты возбуждения существенно влия-

ют на амплитуду колебаний чувствительного элемента, наблюдается срыв колебаний.

Литература

1. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007.
2. **Антонов Е.А., Подалков В.В.** Поведение микромеханического гироскопа L-L типа в режиме вынужденных колебаний // Актуальные проблемы мехатроники и робототехники: Сборник научно-методических статей. М.: Издательство МЭИ, 2015.
3. **Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А.** Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
4. **Лестев М.А.** Нелинейный параметрический резонанс в динамике микромеханического гироскопа // Известия вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 2.
5. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009.

О ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СМЕЩЕНИИ ПОДВИЖНОЙ ОПОРЫ СОСТАВНОЙ ФЕРМЫ

Данная работа посвящена исследованию горизонтального смещения подвижной опоры составной плоской балочной фермы, которая равномерно нагружена по нижнему поясу. Схема конструкции представлена на рис. 1.

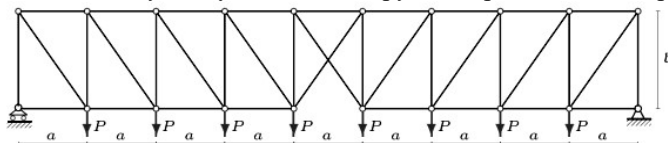


Рис. 1. Ферма при $n = 4$

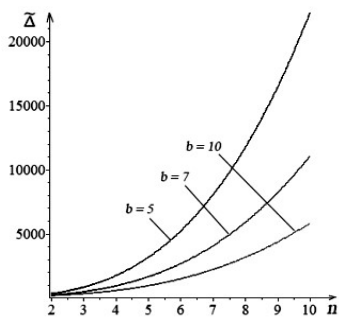


Рис. 2. Зависимость смещения от числа панелей: $L=20$ м

Найдена аналитическая зависимость смещения простой балочной статически определимой фермы под действием нагрузки, равномерно распределенной по узлам нижнего пояса. Задача решена методом индукции [2,3] с применением системы компьютерной математики Maple [1]. Для данной нагрузки смещение определяется по формуле Максвелла – Мора

$$\Delta = P \sum_{i=1}^m (S_i s_i l_i / EF), \text{ где } EF \text{ — жесткость}$$

стержней (одинаковая в такой постановке), S_i — усилия в стержнях от действия нагрузки, s_i — единичной силы в опоре, l_i — длины стержней. Из анализа серии решений для ферм с различным числом панелей получены последовательности коэффициентов, для которых методами Maple найдены общие члены — коэффициенты искомого формулы. Получено выражение

$$EF\Delta_n = Pn \frac{(2n^2 + n + 3)a^3 + 3(n+1)(c^3 + b^3)}{3ab}.$$

Зависимость прогиба, отнесенного к EF/P , от числа панелей при $L = 2an = 20$ м дана на рис. 2.

Литература

1. Кирсанов М.Н. Решебник. Теоретическая механика. М.: Физматлит, 2008.
2. Кирсанов М.Н. Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 6 (24).
3. Кирсанов М.Н. Анализ прогиба фермы прямоугольного пространственного покрытия // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 1 (53).

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ПРИ ПОМОЩИ БАЛАНСИРА

Среди различных видов шагающих роботов часто встречаются четырехногие механизмы, копирующие биомеханику собак, лошадей и других животных. В работах [1,2] представлены описания механики и методов управления мобильными роботами такого вида. Проблема сохранения равновесия робота решается либо путем выбора определенной походки, то есть ограничением кинематики ног, либо применением дополнительных динамических устройств, например маховиков.

В данной работе рассматривается плоская модель шагающего робота с четырьмя двухзвенными ногами. Для устойчивого передвижения механизма используется подвижный балансир, расположенный на корпусе робота. Управление движением робота осуществляется с помощью моментов двигателей, установленных в шарнирах ног.

Исследуемая механическая система имеет восемь степеней свободы, уравнения движения построены в форме уравнений Лагранжа [3,4]. При заданном движении корпуса и ног управляющие моменты определяются из решения обратной задачи динамики и зависят от закона перемещения балансира относительно корпуса. Затем, в соответствии с уравнениями кинестатики, исходя из требования сохранения равновесия корпуса в каждый момент времени и условия равномерного распределения нагрузки на опорные ноги, находится закон движения балансира.

Анализ предложенного способа стабилизации выполнен для заведомо неустойчивой трехопорной ходьбы: корпус движется по прямой, а ноги переставляются по очереди по заданному закону. Определено движение балансира при различных соотношениях масс корпуса и балансира. Показано, что амплитуда перемещения балансира обратно пропорциональна его массе и соизмерима с характерными размерами корпуса.

Литература

1. **Голубятников И.В., Шаныгин С.В.** Уравновешивание двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног с помощью движения рук робота // Вестник МГУПИ. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2009. № 19.
2. **Мобильный** шагающий робот легкого класса / В.В. Жога, А.Е. Гаврилов, В.А. Шурыгин и др. // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3.
3. **Журавлёв В.Ф.** Основы теоретической механики. М.: Физматлит, 2001.
4. **Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г.** Манипуляционные роботы. М.: Наука, 1989.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА С УПРАВЛЯЕМОЙ ПЬЕЗОАКТЮАТОРАМИ ФОРМОЙ

Данная работа посвящена моделированию динамики упругого микро-механического устройства, относящегося к новому классу мехатронных систем. Подобные устройства могут быть использованы, например, в технической диагностике и ремонте различных типов трубчатых каналов, а также доставке военно-технических средств специального назначения.

В рассматриваемой модели реализуется нетрадиционный принцип создания движущих сил — управление формой [1, 2] изгиба упругого трехопорного неразрезного стержня, перемещающегося в канале трубки. Его слоистая структура (пьезокерамика — металл — пьезокерамика и соответствующие проводящие слои) образует пьезоэлектрический актюатор (пьезоактюатор), создающий управляющие воздействия при электрическом нагружении. В соответствии с обратным пьезоэффектом возникает напряженно-деформированное состояние, соответствующее изгибу.

Для реализации движения предлагается использовать трубку, осевая линия которой, в общем случае, является комбинацией двух кривых: линии постоянной кривизны (скелетная кривая) и линии с периодически изменяющейся кривизной. Управляющие воздействия устройства формируются по специальному алгоритму в зависимости от изменения кривизны трубки.

В работе представлена модель модульного упругого микромеханического устройства для доставки грузов. Комбинированная модульная система состоит из активных (описанное выше устройство) и пассивных модулей. Пассивный модуль представляет собой упругий трехопорный неразрезной стержень с полезной массой, сосредоточенной в ползунах.

Исследуется влияние упруго-массовых параметров системы на время переходного процесса, величину средней скорости и уровень неравномерности квазиустановившегося движения робота в трубке, его остановка и возврат в первоначальное положение.

Литература

1. **Лаврентьев М.А.** Об одном принципе создания тяговой силы для движения // ПМТФ. 1962. № 4.
2. **Журавлёв В.Ф.** Об одной модели механизма движения змеи // ПММ. 2002. Т. 66. Вып. 4.

Д.А. Маслов, асп.; рук. И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КОМПЕНСАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ГИРОСКОПА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ В РЕЖИМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В настоящее время вопросам повышения точностных характеристик волновых твердотельных гироскопов (ВТГ), работающих в режиме датчика угловой скорости, уделяется большое внимание [1]. Поэтому актуальной является компенсация влияния различных дефектов резонатора ВТГ.

Рассматривается ВТГ с цилиндрическим резонатором, работающий в режиме датчика угловой скорости. При составлении уравнений динамики резонатора учитывались дефекты гироскопа [2], нелинейные слагаемые [2, 3] и управляющие сигналы [3]. В результате осреднения по методу Крылова—Боголюбова получены уравнения в медленных переменных. Выведены формулы для определения угловой скорости с алгоритмической компенсацией указанных дефектов при нелинейных колебаниях резонатора.

Для компенсации погрешностей гироскопа используются параметры, определяемые по методике идентификации [4], учитывающей нелинейность колебаний. Учет нелинейности значительно повышает точность определения параметров при больших амплитудах колебаний, когда отношение сигнала к шуму достаточно велико.

Получены выражения управляющих сигналов для компенсационного режима, которые учитывают дефекты гироскопа, в том числе и коэффициент нелинейности. Для исследования точности определения угловой скорости основания было проведено математическое моделирование управления волновой картиной колебаний. Результаты оценки угловой скорости совпадают с заданным значением угловой скорости основания. Точность оценки близка к численным ошибкам метода интегрирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00772-а, № 16-08-01269-а).

Литература

1. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1.
2. **Журавлёв В.Ф.** Задача идентификации погрешностей обобщенного маятника Фуко // Изв. РАН. МТТ. 2000. № 5.
3. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009.
4. **Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В.** Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа с учетом нелинейности колебаний резонатора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 5.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

В настоящее время достигнуты большие успехи в области робототехники, но существует ряд до конца нерешенных задач, одной из которых является написание стабильных алгоритмов управления. В результате исследования были реализованы алгоритмы управления мобильным роботом с дифференциальной колесной парой для решения следующих задач: контроль скорости, контроль угла поворота, перемещение из точки в точку. Вспомогательными инструментами для решения поставленных задач являлись колесная одометрия и пропорциональный-интегральный-дифференциальный (ПИД) регулятор.

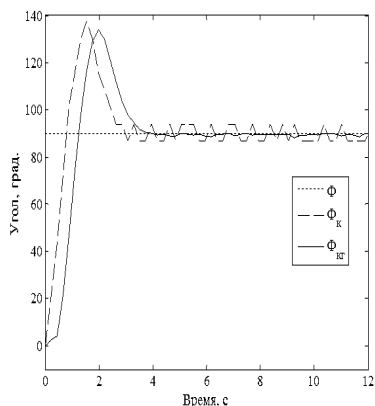


Рис. 1. Контроль угла, $\Phi = 0^\circ$

Рассмотрим результаты работы на примере контроля угла. Контроль угла осуществляется следующим образом: желаемое значение угла поворота мобильного робота задается пользователем, фиксируется значение линейной скорости v . Угловая скорость ω регулируется ПИД-контроллером. Определение скорости и направления вращения колес осуществляется с помощью колесных кодеров. Основным недостатком использования одометрии является то, что неопределенность местоположения мобильной платформы увеличивается с течением времени [1].

Уменьшить эту неопределенность можно, используя дополнительные данные с гироскопа. На рис. 1 представлен результат работы алгоритма контроля угла, здесь: Φ — требуемое значение угла, Φ_k — угол, получаемый с использованием колесных кодеров, $\Phi_{кг}$ — угол, получаемый с использованием колесных кодеров и гироскопа.

Литература

1. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots // IEEE Trans. Robotics and Automation. 1996. Vol. 12. № 6.

А.М. Русаков, асп.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМВОЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Данная работа посвящена актуальной проблеме управления группой роботов. Проведено компьютерное моделирование движения двух мобильных роботов «KUKA youBot», оснащенных манипуляторами, предназначенных для решения различных транспортных задач. Моделирование выполнено в 3D-робосимуляторе V-REP. Результаты компьютерного моделирования могут использоваться для управления движением реального робота.

Построена сцена, которая приближена к реальной задаче, требующей для ее решения двух роботов. Благодаря возможностям симулятора, с помощью API и библиотек для работы с роботами через языки программирования C/C++, Python и Lua встроен разработанный ранее планировщик [1].

Данный способ планирования называется непрерывным. То есть планировщик работает до тех пор, пока цель не будет достигнута либо не будет выявлено, что плана действий не существует.

Начальное и целевое состояния системы и окружающего мира определяется на наиболее удобном для оператора языке планирования RPS. Но весь внутренний процесс планирования осуществлен на стандартном языке описания задач планирования PDDL с использованием известных расширений и библиотек для этого языка [2].

В реальном мире задачи планирования, чтобы быть успешно решенными, часто требуют низкоуровневых действий и действий, предусловия и результаты которых учитывают временную информацию. Например, различные геометрические связи и алгоритмы не могут быть выражены через логику предикатов. Решением этих проблем стало введение понятий продолжительного действия и внешних модулей. Благодаря этому процесс планирования осуществляется на более высоком уровне.

Литература

1. **Русаков А.М., Кобрин А.И.** Планирование как элемент работы группы мобильных роботов // Труды Международной научно-практической конференции: «Информатизация инженерного образования». М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
2. **Dornhege C., Gissler M., Teschner M., Nebel B.** Integrating symbolic and geometric planning for mobile manipulation // In International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2009.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ЗАКОНОВ МЕХАНИКИ

Целью нашей работы было создать установку, на которой можно продемонстрировать все законы в механике в большой аудитории.

Актуальность данной темы в том, что существующие установки оснащены такими измерительными приборами, показания которых видит только учитель и стоящие рядом ученики.

Для реализации этого проекта нам понадобилось собрать несложную схему (рис. 1), состоящую из реостата АВ, источника тока на 5В и демонстрационного вольтметра.



Рис. 1

Известно, что $U = IR$ и $R = \rho l/S$. Подставив значение R в первую формулу, получим $U = I\rho l/S$. Из этой формулы видно, что $U = kl$, где $k = I\rho/S = \text{const}$, так как сила тока I будет практически постоянна, а внутреннее сопротивление вольтметра намного больше сопротивления проволоки R . Таким образом, вольтметр покажет величину пропорциональную пройденному пути, если перемещение движка реостата согласовать с перемещением тела.

Если продифференцировать сигнал с реостата, можно определить мгновенную скорость перемещения тела. Первую производную от пути ко времени можно получить, если воспользоваться электрической схемой, которая называется дифференцирующей цепочкой. Она состоит из конденсатора и активного сопротивления.

Подключив датчик расстояния к дифференцирующей цепочке, можно получить схему скоростемера.

Ускорение, как известно, есть первая производная от скорости ко времени или вторая от пути. Если к схеме скоростемера, добавить еще один дифференцирующий каскад с эмиттерным повторителем, то на ее выходе получится напряжение, которое будет соответствовать ускорению. Для реализации проекта собрана схема, представленная на рис. 2.

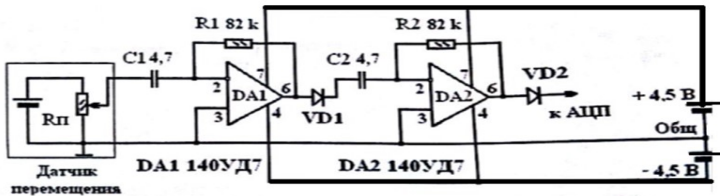


Рис. 2

А.С. Степанов, асп.; рук-ли И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. ;
В.В. Подалков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИКА ГИРОСКОПА В РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПЛАВНОМ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Микромеханические гироскопы (ММГ) применяются в качестве датчиков параметров движения в системах управления, наведения и стабилизации подвижных объектов. Основой для проектирования и дальнейшего увеличения точности микромеханических гироскопов являются математические модели движения чувствительных элементов с учетом медленно изменяющихся внешних условий функционирования, таких как угловая вибрация основания [3] и вынуждающая сила [1].

В настоящей работе объектом исследования является ММГ (рис. 1) с резонатором в виде четырех упругих стержней.

Разработана математическая модель, описывающая динамику микромеханического гироскопа камертонного типа с резонатором в виде четырех упругих нерастяжимых стержней при плавном изменении частоты вынуждающей силы. При получении уравнений движения использован вариационный принцип Гамильтона – Остроградского. С применением процедуры Бубнова – Галеркина [2] построены дифференциальные уравнения для обобщенных координат системы.



Рис. 1. Конструктивная схема микромеханического гироскопа с резонатором в виде упругих стержней

Получено точное решение линейных дифференциальных уравнений для медленных переменных в режиме вынужденных гармонических колебаний при плавно меняющейся во времени частоты внешнего воздействия. Построены амплитудно-частотные характеристики.

Литература

1. Журавлев В.Ф. Управляемый маятник Фуко как модель одного класса свободных гироскопов // Изв. РАН. МТТ. 1997. № 6.
2. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009.
3. Степанов А.С., Подалков В.В., Сбытова Е.С. Влияние медленно меняющейся частоты угловой вибрации основания на динамику микромеханического гироскопа камертонного типа // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 1 (46).

Д.Д. Табунцов, уащ.; рук. Н.А. Ретивов, преп.
(Лицей № 1502 при МЭИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ИХ ВЛАЖНОСТИ

Цель работы исследовать зависимость диэлектрических свойств и электропроводности сыпучих материалов от их влажности.

Вода входит в состав всех пищевых продуктов, тканых, строительных материалов и т.д., и оказывает существенное влияние на физико-химические и физико-механические свойства вещества. Кроме того, многие продукты (зерно, ткани, цемент и др.) могут храниться только при определенной влажности. Поэтому контроль влажности играет важную роль при управлении технологическими процессами в пищевой промышленности и производстве строительных материалов. Прямые методы контроля влажности обладают хорошей точностью, но требуют много времени, поэтому используются только в лабораторных условиях. Экспресс-анализы основаны на измерении параметров зависящих от влажности и их точность ниже прямых методов. Сложность измерения влажности твердых сыпучих и волокнистых материалов заключается в том, что при взаимодействии датчика с материалом может изменяться его структура, насыпная плотность и другие факторы, существенно увеличивающие погрешность прибора.

Косвенные методы основаны чаще всего на измерении одного параметра, зависящего от влажности. Например: *Кондуктометрические гигрометры* — принцип действия основан на зависимости электропроводности материала от влажности. *Диэлькометрические гигрометры* — принцип действия основан на зависимости от влажности диэлектрической проницаемости ϵ вещества или тангенса угла диэлектрических потерь.

В работе одновременно для одних и тех же образцов исследовалась зависимость проводимости и диэлектрическая проницаемость сыпучих материалов (зерно, рис) от влажности. Влажность образцов определяли лабораторным способом (прямым методом). Для исследования электрических свойств изготовили ячейку в виде плоского конденсатора. Изменения выполняли в переменном электрическом поле с частотой 20 МГц. Как и ожидалось диэлектрическая проницаемость вещества (зерна) и проводимость с увеличением влажности растут. Есть основания использовать эти два параметра одновременно для более точного контроля влажности зерна.

*Д.И. Хаматханов, студ.; рук. С.С. Ситников, к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)*

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КАМЕР ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Для получения достоверных и полных данных о зоне наблюдения применяются комплекс технических решений, одним из которых является камера видеонаблюдения. При отсутствии в зоне наблюдения комплексной системы технического зрения или по причине ограниченного углового поля зрения объектива традиционных видеокамер, для предотвращения слепых зон камеры приходится устанавливать чаще.

Это требует большого запаса аппаратных ресурсов и технических возможностей процессорного блока системы видеонаблюдения (GPU, CPU и RAM) и обуславливает низкий уровень комфорта в режиме наблюдения пользователем. Для экономии ресурсов предлагается разработать программно-аппаратный комплекс, который облегчит работу диспетчерам.

Аппаратная часть состоит из модулей PiXu CMUcam5 для обработки изображения, распознавания образов и задач, задаваемых пользователем и платформы Arduino Uno для управления камерой с помощью сервоприводов и хранения конфигураций задач. Модули подключаются через ICSP6PIN и ICSP10PIN порты и работают по протоколу SPI. Программная часть разрабатывается на языке C++ с использованием библиотек OpenCV — для использования алгоритмов компьютерного зрения и `arduino_pixu` для увеличения изображения через объектив.

Настраиваемые конфигурации представляют собой две видимые зоны: пассивную и активную. Пользователь самостоятельно задает эти зоны. При пересечении объектом активной зоны наблюдения на пьезодинамик или светодиод подается короткий сигнал. С помощью библиотеки `arduino_pixu` объектив увеличивает размер изображения. При выходе объекта за заданные пользователем рамки, подключаются сервоприводы камеры, вследствие чего объект остается в кадре пока он в активной зоне. В случае, когда объект теряется в слепой зоне, камера видеонаблюдения ожидает объект 10 секунд, после чего возвращается в исходное положение.

Программа полностью автоматизирует работу пользователя, обеспечивая переключение камеры в ручной режим управления сервоприводами или автоматическое увеличение видеоизображения.

Литература

1. **Юревич Е. И.** Сенсорные системы в робототехнике. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.

Д.А. Цыганов, студ.; рук. О.М. Капустина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОМПЬЮТЕРНОЕ ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МНОЖЕСТВА ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ МОБИЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Мобильные манипуляторы представляют собой активно разрабатываемый класс роботов. При планировании траекторий и управлении движением необходимо определять возможные конфигурации робота, отвечающие требуемому положению схвата или инструмента, удерживаемого схватом. В этом заключается обратная задача кинематики [1], имеющая для кинематически избыточных механизмов бесконечно много решений. Наличие точного решения позволяет строить более эффективные по быстродействию алгоритмы управления, а также описывать все множество возможных конфигураций робота. При этом важно найти параметры, позволяющие выделять отдельные элементы из всего множества решений. Графические иллюстрации в виде трехмерных изображений робота способствуют лучшему пониманию закономерностей движения.

В [2] описан алгоритм построения точного решения обратной задачи кинематики для кинематически избыточного робота KUKA youBot [3], которым располагает кафедра робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ», а также указан один из наборов параметров, определяющих отдельные решения. Можно показать, что такой набор параметров не является единственным.

В докладе представлена программа на языке системы символьных вычислений Mathematica, создающая трехмерное изображение KUKA youBot, соответствующее каждому из возможных точных решений обратной задачи кинематики при различных фиксированных значениях указанных параметров. Выбранный набор параметров отличен от предложенного в [1].

Результаты работы найдут дальнейшее применение при исследовании различных проблем управления роботом KUKA youBot.

Литература

1. **Khatib, O.; Siciliano, B., editors:** Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2008.
2. **Sharma S., Kraetzschmar G. K., Scheurer C., Bischoff R.** Unified closed form inverse kinematics for the KUKA youBot // Proceedings of the 7th German Conference on Robotics, May 2012, Munich, Germany. P. 1–6.
3. **Промышленные** роботы KUKA. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kuka-robotics.com>

Направление
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —

директор ИЭЭ, д.т.н.,
чл.-корр. РАН П.А. Бутырин

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — к.т.н., доцент О.Н. Кузнецов

Секретарь секции — ассистент А.Н. Шаров

*М.Р. Баталова, студ.; рук. В.М. Дашков, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)*

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ОПОР

Любая электроэнергетическая система состоит из взаимосвязанных элементов: генераторов, трансформаторов, опор, проводов и т. д. Ее надежная работа во многом зависит от воздушных линий электропередачи, важным элементом которых является опора.

Выбор конкретного типа и марки опор существенно влияет на технико-экономические показатели сетей. В последние годы ведутся исследования опор из различных материалов, и внедряется в практику их строительство.

В данной работе приводятся результаты сравнительного анализа нескольких типов опор: деревянных, многогранных металлических и композитных – с железобетонными.

Перспективным типом считаются многогранные металлические опоры (ММО). Большинство авторов приводит в пользу их применения следующие доводы: низкая стоимость, удобство монтажа и транспортировки и т. д.

Однако анализ применения ММО в сетях 0,4 кВ г. Самара, проведенный авторами, показал, что следует более тщательно подходить к вопросу об их применении, так как технологии сооружения фундаментов и установки стоек для таких опор довольно трудозатратны.

Применение композитных опор находится на начальной стадии, причем их рекомендуют применять лишь в качестве ремонтных или в труднодоступной местности, так как необходимы дальнейшие длительные исследования их работы при разных механических нагрузках и климатических условиях [1].

В докладе приводятся конкретные результаты сравнения применения разных типов опор в различных условиях.

Анализ проектов, выполненных для реальных заказчиков, показывает, что железобетонные опоры используются в подавляющем большинстве случаев, а доля современных типов опор ничтожно мала.

Результаты данной работы позволят выбрать рациональный вариант типа опор с учетом конкретных климатических и экономических условий строительства, характеристик грунтов, а также сечения используемых проводов воздушных линий электропередач.

Литература

1. Власов В.В., Сухар В.М. Опыт разработки, изготовления и проведения испытаний легких одноцепных и двухцепных промежуточных опор из композиционных материалов для высоковольтных линий 110—220 кВ для проведения аварийно-восстановительных работ и применения в труднодоступной местности // Воздушные линии. 2014. № 4.

*А.Д. Бачурина, А.А. Дьячков, студенты; Абель Танкой асп.;
рук-ли А.М. Соколов, д.т.н., доц.; Т.Е. Шадриков, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОТБОРОМ МОЩНОСТИ

Высоковольтные системы электропередачи с частотой 10—20 кГц могут использоваться в целях локального электропитания технологических установок промышленных предприятий [1—3]. Например, одно из наиболее перспективных направлений их применения это реализация нового и весьма энергоэффективного технологического процесса строительной отрасли – электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона [4]. Питание технологических установок от преобразователя частоты при большом количестве потребителей целесообразно осуществлять с помощью магистрального кабеля с промежуточными отпайками. Актуальной становится задача анализа и расчета параметров такой разветвленной сети.

С помощью программы MatLab разработана математическая модель кабельной электропередачи повышенной частоты. Личный вклад авторов заключается в переработке программной части для моделирования процессов в разветвленной электропередаче. Для получения опытных данных используется экспериментальная модель кабельной электропередачи.

Основная задача работы — сравнение результатов расчета различных режимов работы электропередачи с соответствующими данными, полученными работы на физической модели. Полученные результаты могут быть использованы в ходе опытной реализации разветвленной электропередачи повышенной частоты в условиях действующего производства.

Литература

1. **Принципы** организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др. // Энергетик. 2014. № 3. С. 46—49.
2. **Принципы** организации современной электроэнергетики, продолжение / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др. // Энергетик. 2014. №4. С. 15—18.
3. **Технико-экономические** показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Энергетик 2015. № 2. С. 11—14.
4. **Электротепловая** обработка бетона токами различной частоты / С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин и др. // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 2—7.

И.М. Бронников, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЙТИНГА ЛИНИЙ В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ЕЭС РОССИИ

Согласно [1], за рубежом широко распространена технология динамического рейтинга линий (ДРЛ), применяемая с целью повышения пропускной способности и направленная на повышение технико-экономических показателей электроэнергетической системы.

Выявлен ряд организационно-технических ограничений, существующих на данный момент в ЕЭС России, которые не позволяют повсеместно внедрить данную технологию. Это связано с внутренними разногласиями между АО «СО ЕЭС» (далее СО ЕЭС) и ОАО «ФСК ЕЭС» (далее ФСК). СО ЕЭС заинтересован в данной технологии, т.к. она позволит расширить максимально допустимый переток (МДП) по системообразующим связям, усовершенствует систему управления ЕЭС, в особенности в пиковых режимах. Но основное оборудование находится в собственности ФСК, и инвестирование в установку оборудования ДРЛ для ФСК экономически нецелесообразно. В этом и есть проблема между двумя организациями

Предлагается решение по изменению существующей документации, регулирующей взаимодействие между организациями, а также решение ряда технических вопросов:

- Разработка режимных инструкций по планированию режимов с учетом погоды, в т.ч. изменение алгоритмов ЦСПА и АОПО на основе уже предложенных алгоритмов [2].
- Разработка методики выбора ВЛ для установки устройств ДРЛ с учетом потребности в увеличении МДП, фактического состояния ВЛ (учет статистических показателей отказа). Критерий выбора мест для установки датчиков на линии.

Итогом работы стала концепция управления режимами ЕЭС посредством ДРЛ, повышающая надежность энергосистемы и использующая существующее оборудование экономически максимально. Позволяющая повысить рентабельность будущих и существующих объектов капитального строительства, реструктуризировать инвестиционные программы и снизить расходы.

Литература

1. **Gene Wolf.** Чем больше информации о сети, тем выше ее пропускная способность // Transmission and Distribution World. Russian edition, янв-февр 2014.
2. **Сацук Е.И., Лужковский Ю.И., Засыпкин А.С., Тетерин А.Д.** Алгоритмы адаптивной автоматики ограничения перегрузки воздушной линии электропередач с контролем температуры провода // Энергетик. 2015. № 12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТАНОВКИ УПРАВЛЯЕМОГО УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА РЕЖИМ ЭЭС

Устройства продольной компенсации (УПК) применяются для увеличения пропускной способности воздушных линий электропередач и представляют собой батареи конденсаторов, включаемые последовательно в линии для компенсации части продольного индуктивного сопротивления. Особое значение приобретает использование управляемых УПК (УУПК), в которых часть конденсаторной батареи шунтируется тиристорно-реакторной группой, позволяющей плавно изменять ее эквивалентную емкость в зависимости от режима работы линии [1]. Актуальность выбранной темы определяет экономичность применения УПК в качестве альтернативы сооружению новых линий, что оказывается выгодным из-за меньшей стоимости устройств и времени строительства.

Была разработана программа, которая позволяет при разных исходных данных сети СВН и мощности промежуточных подстанций построить графики зависимости пропускной способности от степени компенсации в различных точках размещения УПК. Наиболее целесообразным с точки зрения экономической составляющей является вариант, в котором увеличение пропускной способности достигается при меньшей мощности УПК. Для заданной схемы электропередачи с двумя промежуточными подстанциями были проведены исследования для определения точки размещения УПК с наименьшей установленной мощностью, и выбором степени компенсации. Было выявлено два наиболее целесообразных места установки УПК, проведено их технико-экономическое сравнение и выбрано наилучшее. Перспектива применения данной разработки — это применение созданной программы при проектировании электропередачи СВН с двумя промежуточными подстанциями.

Литература

1. ПАО «ФСК ЕЭС». Устройства продольной компенсации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fsk-ees.ru/innovation.html>

НАБЛЮДАЕМОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В настоящее время в условиях высоких требований к качеству электрической энергии (ЭЭ) в РФ [1] фактически наблюдается существенный уровень искажений в энергосистеме (ЭС) как в распределительных сетях низкого класса напряжения, так как и в сетях высокого класса напряжения вплоть до системообразующих [2]. Высокая стоимость низкого качества ЭЭ [3] стимулирует отрасль к применению различных средств компенсации искажений (СКИ) ЭЭ. В свою очередь высокая стоимость СКИ обуславливает необходимость перед их применением точно знать источники различных типов искажений, что побуждает научное сообщество к развитию методов анализа искажений качества ЭЭ в ЭС на основе результатов измерений в различных узлах энергосистемы, т.е. к улучшению наблюдаемости ЭС.

Наблюдаемость ЭС — это качественная характеристика системы, обуславливающая способность наблюдателя делать вывод о ее состоянии в условиях ограниченного набора исходных данных. При этом разделяется понятие наблюдаемости топологии ЭС и режима работы ЭС: отдельно для оценки конфигурации сети и оценки вклада отдельного потребителя в искажения качества ЭЭ в данной топологии. Таким образом, введены понятия *наблюдаемости топологии* (НТ) и *наблюдаемости режима работы* (НР) ЭС. Для оценки НТ использована расчетная модель ЭС, определяющая входные сопротивления электрической цепи в исследуемых узлах, позволяющие определить связь исследуемого узла и источника искажений. Для оценки НР — использована зависимость между током нагрузки потенциального источника и искажениями в исследуемых узлах отдельно для показателей, связанных с несимметрией напряжения, токами высших гармоник и изменением напряжения. Таким образом, давая комплексную оценку наблюдаемости ЭС, можно повысить точность применения СКИ, что в свою очередь приведет к снижению затрат на обеспечение требуемого качества ЭЭ. Модели исследуемых энергосистем составляются на основе результатов измерений и данных эксплуатирующих организаций.

Литература

1. ГОСТ 32144—2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, 2014.
2. Дворкин Д.В. Определение типов средств компенсации искажений синусоидальности и симметрии напряжения и разработка методики определения мест их установки. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 140 с.: ил. и прил.
3. Чэпмэн Д. Цена низкого КЭ // Энергосбережение. 2004. № 1.

Р.А. Домашнев, студ.; рук. О.Н. Кузнецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОСОБИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ПРИМЕНЕНИЕ ПВК *ETAP* ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС»

Текущий уровень развития электроэнергетической системы (ЭЭС) требует, чтобы выпускники профильных вузов владели навыками расчета электрических режимов в специализированных программно-вычислительных комплексах (ПВК). В настоящее время такими комплексами являются *Rustab*, *EuroStag*, *DigSilent*, *PSS/E*, *ETAP* и подобные, применяемые в АО «СО ЭЭС», АО «Институт «Энергосетьпроект», ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЭЭС» и на других предприятиях отрасли. ЗАО «ETAP Системс» в рамках реализации соглашения о сотрудничестве предоставляет возможность проводить лабораторные работы с применением ПВК *ETAP*.

Обучение студентов навыкам работы в *ETAP* сопряжено со следующими трудностями:

- различный объем исходных данных для описания моделируемой ЭЭС, которые применяются в отечественных ПВК и в *ETAP*;
- некорректность использования некоторых терминов в русскоязычной версии *ETAP* и сокращенная версия перевода его англоязычной справки.

Целью работы является разработка методического пособия для студентов по выполнению лабораторной работы «Применение ПВК *ETAP* для расчета динамической устойчивости электроэнергетической системы».

Помимо введения с указанием цели и содержания работы методическое пособие включает в себя несколько разделов. В первом разделе описана подготовка к лабораторной работе, которая составлена для 16 вариантов исходных данных. Во втором разделе изложен порядок проведения расчетов динамической устойчивости при различных типах, длительности и месте приложения возмущающего воздействия (короткого замыкания), а также учет автоматического повторного включения. В разделе «Методические указания» приведено детальное описание процедуры расчета электромеханических переходных процессов в ПВК *ETAP*, начиная с запуска программы и заканчивая формированием отчета в файл редактируемого формата офисных приложений. В методических указаниях используются скриншоты инструментов рабочей области *ETAP*.

После тестирования методическое пособие будет применяться при выполнении лабораторной работы по одной из дисциплин магистерской программы подготовки «Электроэнергетические системы и сети, их режимы, устойчивость, надежность и качество электрической энергии».

А.А. Куандыкова, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ КОМПАКТНЫХ ВЛ 500 кВ

В области электроэнергетики весьма актуальной является задача совершенствования способов передачи и распределения электроэнергии, управления режимами энергосистем и снижения затрат на строительство и эксплуатацию. Применяемые в настоящее время линии электропередачи не всегда отвечают необходимым требованиям, главным образом из-за недостаточной пропускной способности, несовершенства систем управления, значительной стоимости и ощутимого экологического влияния. Дальнейшее успешное развитие энергосистем может быть осуществлено только на базе новых технических решений с применением комплекса современных технических средств, устройств и систем.

В ряде научных работ, выполненных в последние годы, показано, что наиболее эффективным в электросетевом строительстве для формирования энергосистемы является применение электропередач нового типа, выполненных на базе компактных воздушных линий [1]. Применение компактных линий актуально и приоритетно в условиях стремительно развивающегося энергопотребления мегаполисов, где возрастает дефицит мощности, и стоимость земли возрастает многократно.

В целях изучения влияния компактных линий на работу энергосистемы, в данной исследовательской работе проводится анализ изменения режимных параметров электрической сети при замене участков ВЛ 500 кВ традиционного исполнения протяженностью более 250 км на ВЛ500 кВ компактного исполнения. Путем проведения анализа экономичности передачи натуральной мощности, аналитическим образом выведено оригинальное квадратное уравнение для вычисления относительных значений натуральной мощности на приемном конце реальной линии. Получены результаты, которые подтверждают улучшение электрических параметров линий, существенно превосходящих технические и экономические показатели электропередач традиционного исполнения, изменение параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве, что делает возможным отказаться от традиционных траверс и значительно сократить габариты опор.

Литература

1. Зарудский Г.К., Самалюк Ю.С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ // Электричество. 2013. № 5.

*И.С. Кулаев, И.Д. Кубарьков, студенты;
рук. Ю.П. Кубарьков, д.т.н., проф. (СамГТУ, г. Самара)*

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Одно из важнейших направлений развития электроэнергетики в России это переход к созданию интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). Переход к подобной системе направлен на увеличение качества производства и передачи электроэнергии [1].

В данный момент в электроэнергетических системах регулирование напряжения реализуется организационно-технической системой. Основа системы – это автоматические регуляторы генераторов и РПН силовых трансформаторов, но этого недостаточно для поддержания уровня напряжения на допустимом уровне в ряде ремонтных и послеаварийных режимов.

На сегодняшний день эффективным способом регулирования напряжения в электрических сетях является установка дополнительных источников реактивной мощности, которые являются элементами активно-адаптивной цепи при управляемом исполнении [3].

Задачей является разработка способа координированного управления напряжением и потоками мощности, чтобы он мог быть реализован в рамках управляющих структур, существующих распределительных систем, а также мог использовать уже работающие каналы передачи данных в инфраструктуре.

Данная задача оптимизации уровней напряжения решается с помощью метода роя частиц, с учетом соответствующей модели регулирующего устройства. Для оценки результата и проверки эффективности регулирования использована тестовая сеть. Полученные результаты показывают, что используемый регулятор может значительно улучшить профиль напряжения сети путем изменения параметров имеющейся генерации и способов управления напряжением [2,4].

Литература

1. **Дорофеев В.В., Макаров А.А.** Активно-адаптивная сеть — новое качество ЭЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4.
2. **М. Sedighizade and A. Rezazade**, Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile, // in Proceedings of World Academy of Science and Technology. 2008. Vol. 27.
3. **Гольдштейн В.Г., Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В.** Сохранение стабильного уровня напряжения в сетях с помощью мультиагентных систем // Журнал Электрооборудование – эксплуатация и ремонт. 2015. № 8. С. 42—49.
4. **Карпенко А.П., Селиверстов Е.Ю.** Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации // Наука и образование. 2009. № 3.

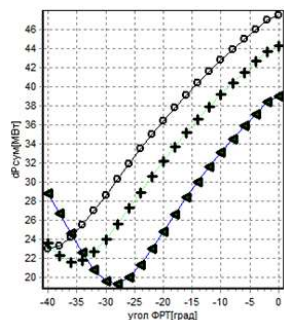
Т.В. Левкина, студ.; рук. О.В. Дичина, к.т.н., доц. («НИУ «МЭИ»);
науч. конс. А.С. Мурачев (ОАО «ЭНИН»)

ПОВЫШЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПЕРЕТОКАМИ МОЩНОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ КОЛЬЦЕ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Перетоки мощности между энергосистемами и их объединениями (ОЭС) ограничены пропускной способностью линий электропередач (ЛЭП) низкого класса напряжения, работающих параллельно с ЛЭП высокого класса напряжения. Данная ситуация характерна для неоднородного кольца электропередачи 220-500 кВ ПС Восход – ПС Татарская – ПС Барабинская, являющегося частью межсистемной связи ОЭС Урала – ОЭС Сибири. В зависимости от времени года и имеющихся ограничений по уровню воды в водохранилищах ГЭС Сибири могут наблюдаться реверсивные потоки мощности между ОЭС. При этом существуют режимы, при которых в неоднородном транзите 220-500 кВ имеет место предельная загрузка ЛЭП 220 кВ по термической стойкости и недогрузка ЛЭП 500 кВ. Для решения такой проблемы целесообразно применять фазоворотный трансформатор (ФПТ) [1].

Была создана модель для расчетов перетока между ОЭС Урала и ОЭС Сибири и проведена его оптимизация при установке ФПТ. Для оптимизации была написана программа на языке программирования Delphi, которая рассчитывает режим при различной передаваемой мощности и оптимальный угол ФПТ. При нагрузках до 1500 МВт нет необходимости использования ФПТ. При передаваемой мощности 1500 МВт по линии 220 кВ протекает ток 706 А, что превышает длительно-допустимый. При использовании ФПТ с рассчитанным углом 4° ток снижается до допустимого значения. Проведено исследование влияния изменения угла ФПТ на уровень потерь мощности, например, при изменении угла ФПТ на 15° при передаче мощности 1500 МВт потери снижаются на 12 МВт (рис. 1).

Установка ФПТ позволяет повысить предел передаваемой мощности в сечении ОЭС Урала – ОЭС Сибири. ФПТ между энергосистемами сможет контролировать переток мощности и снижать его до допустимых значений.



— точка 1P_р=1 000.0 + точка 4P_р=1 300.0
— точка 6P_р=1 500.0
марных потерь от угла ФПТ

Литература

1. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус Пресс, 2011.

Б. Р. Мищенко, студ.; рук. Д.В. Саленик, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

МАТРИЦА КОММУТАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ В РАСЧЕТАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

При оценке показателей функциональной надежности ЭЭС приходится рассматривать множество послеаварийных коммутационных состояний с целью выявления перегруженных элементов, определяющих недоотпуск электроэнергии в схеме.

Перегрузка элементов сети определяется по известной методике [1] с применением матрицы коэффициентов распределения токов $C = Y_B M^T (M Y_B M^T)^{-1}$. Данная матрица в различных коммутационных состояниях претерпевает изменение.

Коммутации в схеме можно учесть изменением сопротивления коммутируемых ветвей в матрице Y_B путем умножения ее на матрицу коммутационных состояний $Y_{BK} = K_C Y_B$, где K_C — диагональная матрица коммутационных состояний элементов сети, все диагональные элементы которой равны единице, кроме отключаемых элементов, значение для них принимается равным $10^7 \div 10^9$.

Тогда матрица коэффициентов распределения токов для каждого коммутационного состояния вычисляется как:

$$C_c = K_C Y_B M^T (M K_C Y_B M^T)^{-1}. \quad (1)$$

Данный способ представления матрицы C позволяет формализовать расчет множественных состояний схемы, для чего матрицу K_C можно представить, как трехмерную матрицу (массив) со множеством различных коммутационных состояний.

В общем случае матрица K_C может формироваться алгоритмически по правилам комбинаторных перестановок. Таким образом, можно автоматизировать расчеты функциональной надежности для различных состояний схемы сети.

Метод применим при оценке надежности небольших схем. В расчетах сложных схем коммутационных состояния могут учитываться подобным образом, но без пересчета всех элементов матрицы C [1].

Литература

1. **Фокин Ю.А.** Методика оценки параметрической надежности систем электроснабжения. М.: МЭИ, 1987.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Современное технологическое управление в электроэнергетических системах (ЭЭС) невозможно без наличия качественной телеинформации и расчетов режимов электрических сетей на основе телеизмерений. В настоящее время основным источником достоверной режимной информации служат комплексы телемеханики и расчеты оценки состояния (ОС) ЭЭС. В энергосистемах России внедрены и успешно эксплуатируются программно-технические комплексы СК-2007(2011) и PSControl.

Результатом ОС является оцененный режим наиболее приближенный к телеизмерениям (ТИ). Для оценки отклонений измеренных значений от вычисленных используется целевая функция [1]:

$$F(x) = \frac{\sum_i^n (X_{\text{расч}i}^2 - X_{\text{изм}i}^2)}{\sigma_i^2},$$

где $X_{\text{расч}}$ — расчетное значение; $X_{\text{изм}}$ — измеренное значение; σ — относительная ошибка измерения.

На примере расчетов ОС в режиме on-line проведено исследование влияния параметра телеизмерения – относительной ошибки измерения на расчеты оценки состояния в реальных электрических сетях. Для расчетов использовался программный комплекс PSControl. Исследовались такие параметры, как сходимость расчета ОС, выраженная в количестве итераций, и точность расчета по количеству оцененных невязок.

В зависимости от точности установленных комплексов телемеханики на подстанциях задавалось значение относительной ошибки измерения в диапазоне от 1 до 10 %. Сравнивались результаты расчета ОС при одинаковых относительных ошибках измерения для всех ТИ, а также при их варьировании. При настройке параметров ТИ удалось получить более точное решение задачи ОС с меньшим количеством невязок, однако количество итераций возросло. Данную разработку можно применить в центрах управления сетями, что обеспечит более точное решение задачи ОС с меньшим количеством невязок.

Литература

1. **Автоматизация** диспетчерского управления в электроэнергетике / под ред. Ю.Н. Руденко, В.А. Семёнова. М.: Издательство МЭИ, 2000. 648 с.

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЭЭС ПРИ ЗАДАНИИ НАГРУЗОК В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

При оценке недоотпуска электроэнергии в расчетах функциональной надежности ЭЭС, а также при расчетах показателей качества напряжения в СЭС часто требуется знать характер изменения параметров режима ЭЭС во времени. Для этих целей находят применение методы расчета режимов, реализуемые во временной области и в вероятностной постановке.

В работе предлагается использовать метод расчета режимов ЭЭС, реализуемый в частотной области. Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ над вышеперечисленными методами, наиболее существенным является небольшой объем исходной информации, необходимый для выполнения расчетов. Благодаря использованию небольшого количества параметров модели нагрузок, представляемых в частотной области [1], уменьшается вычислительная сложность алгоритма в сравнении с расчетами, реализуемыми во временной области, вследствие чего повышается скорость вычисления искомого величин, сохраняется больше информации о параметрах режима, нежели получаемые в вероятностных методах.

Расчет в частотной области реализуется с применением метода матрицы Z_y . При построении итерационного процесса расчета задающих токов узлов было обнаружено, что уже после первого приближения в напряжениях узлов появляются гармонические составляющие, не представленные в исходных данных нагрузок, что становилось причиной невозможности определения последующих приближений задающих токов. После изучения описанной проблемы был предложен путь ее решения, заключающийся в выполнении на каждой итерации свертки матриц обобщенных параметров схем замещения сети и параметров режима, представленных в частотной области. Тогда искомым ток узлов на каждой итерации определится как

$$\mathbf{J}(\omega) = [\text{diag}(\mathbf{U}(\omega))]^{-1} \otimes \mathbf{S}_y(\omega) \Leftrightarrow \mathbf{J}(t) = [\text{diag}(\mathbf{U}(t))]^{-1} \mathbf{S}_y(t). \quad (1)$$

Расчет напряжений узлов, в частотной области реализуется так:

$$\mathbf{U}_\Delta(\omega) = \mathbf{Z}_y(\omega) \otimes \mathbf{J}(\omega) = \mathbf{Z}_y(\omega) \otimes [\text{diag}(\mathbf{U}(\omega))]^{-1} \otimes \mathbf{S}(\omega). \quad (2)$$

Предлагаемый метод расчета имеет перспективы применения в программах расчета режимов ЭЭС, является альтернативой методам расчета во временной области и в вероятностной постановке.

Литература

1. Фокин Ю.А., Пономаренко И.С., Павликов В.С. Экспериментальное исследование вероятностно-статистических характеристик нагрузок в электроснабжающей системе. // Электричество. 1983. № 9.

*А.В. Проничев, студ.; рук. Е.М. Шишков, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)*

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЫ В РАЗОМКНУТЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Установки продольной компенсации являются неотъемлемым элементов сверхдальних передач переменного тока. В середине XX века профессором Н.Ф. Ракушевым [1] был предложен способ реализации идеи продольной самокомпенсации – разомкнутая воздушная линия электропередачи (ВЛ), каждая фаза которой состоит из двух изолированных друг от друга проводников, один из которых подключен к шинам передающей подстанции, а второй – к шинам приемной. В работе [2] авторами предложена усовершенствованная конструкция разомкнутой ВЛ, выполненная по принципу расщепления фазы.

Целью настоящей работы является расчет величин взаимных емкостей составляющих расщепленной фазы разомкнутой ВЛ для последующей оценки эффективности ее конструкции с использованием результатов расчетов установившихся режимов.

Расчет емкостных связей расщепленной фазы был произведен в пакете программ Elcut. Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи используются методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScapе SimPowerSystems. Выполнен анализ режимов работы линий для различных конфигураций расщепленной фазы.

В работе установлено, что наименьшее значение длины полной самокомпенсации в разомкнутой линии достигается при максимально возможном сближении составляющих расщепленной фазы. Вследствие этого при проектировании разомкнутых линий следует уменьшать сечение одиночной составляющей, увеличивая их количество, а также чередовать прямые и встречные составляющие расщепленной фазы. Полученные результаты будут использованы при дальнейшей разработке технологии передачи электроэнергии по разомкнутым ВЛ.

Литература

1. **Ракушев Н.Ф.** Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. М.: Госэнергоиздат, 1957. 160 с.
2. **Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М.** Пат. 130458 РФ, МПК8 Н 02 J 3/20. Разомкнутая трехфазная воздушная линия электропередачи переменного тока / ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет". №2013103649/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

А.Н. Рожков, асп.; рук. Д.И. Панфилов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АДАПТАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА К ИЗМЕНЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Одним из эффективных способов повышения устойчивости и надежности энергосистем, повышения пропускной способности электрических сетей, снижения транспортных потерь активной мощности является создание гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока (FACTS), в том числе применение фазоповоротных устройств (ФПУ) с тиристорным управлением [1]. Вместе с тем вопрос управления режимами работы линий электропередачи (ЛЭП) с помощью ФПУ является не достаточно освещенным как в зарубежной, так и в отечественной литературе.

В докладе описан подход к получению регулировочной характеристики ФПУ в конкретном месте его установки с целью обеспечения требуемых режимов работы ЛЭП в условиях изменяющихся параметров энергосистемы. Расчет регулировочной характеристики ФПУ производится с использованием двухмашинной модели энергосистемы и модели ФПУ [1]. Показано, что параметры модели ФПУ могут быть вычислены из режимов работы ЛЭП. Идентификация параметров моделей и вычисление регулировочной характеристики для конкретного места установки ФПУ осуществляется в специальном блоке его системы управления (блоке регулятора) на основе информации о режимах работы ЛЭП при различных управляющих воздействиях на ФПУ. Показана возможность применения модели ФПУ для расчета режимов работы ЛЭП с использованием 39-ти узловой [2] и эквивалентной ей двухмашинной модели энергосистемы.

Разработки, представленные в докладе, позволят осуществлять экспериментальное определение характеристик ФПУ для конкретного места его установки в энергосистеме. Соблюдение требований, сформулированных к блоку регулятора системы управления ФПУ, позволят корректировать его регулировочную характеристики в условиях изменения параметров энергосистемы.

Литература

1. **К расчету режимов работы линий электропередачи с управляемыми фазоповоротными устройствами** / М.Г. Асташев, М.А. Новиков, Д.А. Панфилов и др. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 1. С. 15—23.

2. **T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability**// IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. Pas-98. No. 2. March/April 1979. P. 573—584.

М.С. Русскова, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ КРИТИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ОТКАЗОВ

Неудовлетворительное техническое состояние и высокая степень износа основного электротехнического оборудования (ЭТО) приводят к большему количеству отказов и снижению надежности системы; длительные перегрузки оборудования с высокой степенью износа могут стать «иницирующим событием» для перехода аварии к каскадному развитию.

В связи с этим актуальным вопросом является необходимость прогнозирования отказов, сочетающего в себе подходы к определению технического состояния элемента электроэнергетической системы (ЭЭС) и его перегрузки по току и напряжению в аварийных режимах. Для решения поставленного вопроса разработана методика, в которой предложен комплексный подход к определению реального технического состояния оборудования подстанций и линий электропередачи. Полученные результаты расчета позволяют своевременно определить наиболее критичные с точки зрения надежности и отказоустойчивости элементы системы.

Входными данными для расчета по предложенной методике служат список оборудования с указанием индекса технического состояния и перечень перегруженных по току элементов ЭЭС в аварийном режиме. Разработанная в рамках настоящего исследования методика позволяет получить следующие результаты:

- перечень возможных ненормативных возмущений для рассматриваемой схемы (под ненормативным возмущением понимается комбинация возмущений, отнесенных к нормативным [1], с единичными отказами оборудования);
- последствия отказов оборудования и возможные сценарии дальнейшего развития аварии с учетом реального технического состояния оборудования для реализации принципов превентивного управления [2]).

Разработанная Методика может быть применена для учета технического состояния ЭТО при формировании инвестиционных программ по обновлению фонда основного электротехнического оборудования и при реализации концепции «ремонт по состоянию».

Литература

1. **СО 153-34.20.576-2003.** «Методические указания по устойчивости энергосистем».
2. **Интеллектуальное** противоаварийное управление режимами энергосистем / Д.А. Панасецкий, Н.В. Томин, В.Г. Курбацкий и др. // ВСПУ-2014.

*Р.И. Саубанов, студ.; рук. М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)*

ПРОБЛЕМА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ УСТРОЙСТВ РПН СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Анализ гистограмм распределения напряжения на шинах 10 кВ районных трансформаторных подстанций показывает, что без регулирования напряжения на них практически невозможно обеспечить приемлемый режим напряжения у потребителя. И на данном этапе развития электроэнергетики существует проблема повреждаемости РПН.

Актуальность проблемы обусловлена тем, что РПН силовых трансформаторов — сложный и недостаточно надежный узел силового трансформатора. Согласно статистике, 35—60 % общих отказов трансформаторов связано с повреждением РПН.

Вариантом решения является замена существующих систем РПН тиристорными переключающими устройствами с вольтодобавочными трансформаторами (ТПУ с ВДТ), обеспечивающие изменение коэффициента трансформации с высоким быстродействием [1].

В рассматриваемой системе используется принцип геометрического сложения и вычитания векторов напряжения первичной обмотки силового трансформатора с векторами напряжения вторичной обмотки ВДТ.

Было проведено технико-экономическое сравнение трансформаторов ТМН-1000/10 [2] и ТМ-1000/10 [3] с ТПУ ВДТ. Стоимость вспомогательного трансформатора составляет 350 тыс. рублей. Также были выбраны тиристоры для регулирования напряжения Т161-200 в количестве 32 шт., цена за штуку 780 рублей [4].

В результате было выявлено, что стоимость ТМ-1000/10 с ТПУ ВДТ ниже стоимости ТМН-1000/10 на 15 %. Также надо учесть, что изменение коэффициента трансформации в ТПУ с ВДТ происходит без образования электрической дуги, увеличивается срок службы трансформатора.

Перспективой данной темы является решение проблем повреждаемости РПН путем использования другого принципа регулирования, используя полупроводники и вспомогательный трансформатор.

Литература

1. **Туманов И. М., Алтуниев Б. Ю.** Тиристорные и тиристорно-контактные установки для стабилизации и регулирования параметров электроэнергии: учебн. пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 1993.
2. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru-transformator.ru/tmn-price/tmn-1000-35-10-536.html>
3. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru-transformator.ru/tm-price/tm-1000-35-10-102.html>
4. [Электронный ресурс]. URL: <http://bizorg.su/komplektuyushtie-i-materialy-dlya-elektroniki-obshtee-r/p124144-t161160-t161200-tiristor>

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО РАЗОМКНУТЫМ КАБЕЛЬНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Одним из способов снижения потерь в линии электропередачи является ее настройка на резонанс напряжений [1]. В работе [2] предложена разомкнутая кабельная линия электропередачи (РКЛ), в которой распределенная внутрифазная емкость, компенсирующая продольное индуктивное сопротивление, образуется между двумя жилами высоковольтного кабеля.

Целью настоящей работы является определение конструкции кабеля общего участка самокомпенсированной РКЛ, оптимальной с точки зрения наибольшей величины внутрифазной емкости и наибольшего значения предельно допустимой плотности тока.

Для моделирования электростатических и тепловых процессов внутри фазы РКЛ и получения значения внутрифазной емкости, использовался компонент программный комплекс *Elcut 6.2*. Анализировались кабели с медными жилами сегментного и коаксиального исполнения.

Таблица 1

Результаты расчетов

Среда прокладки кабеля	Предельно допустимая плотность тока, А/мм ²		Внутрифазная емкость, пФ/м	
	Сегментное исполнение	Коаксиальное исполнение	Сегментное исполнение	Коаксиальное исполнение
Воздух	5,3	5,04	50÷120	150÷450
Сухой грунт	7,4	6,94		
Влажный грунт	8,94	8,28		

Из результатов расчета видно (табл. 1), что сегментное исполнение кабеля является предпочтительным с точки зрения предельно допустимой плотности тока РКЛ, а коаксиальное позволяет добиться больших значений внутрифазной емкости. Следовательно, при проектировании РКЛ для небольших расстояниях передачи следует использовать коаксиальное исполнение кабеля и уменьшать расстояние между токопроводящими жилами.

Литература

1. Готман В.И., Глазачев А.В., Бацева Н.В. Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами // Известия ТПУ. 2011. Т. 319. № 4.
2. Пат. 161995 РФ, МПК8 Н 02 J 3/20. Разомкнутая трехфазная кабельная линия электропередачи переменного тока / В.Г. Гольдштейн, Е.М. Шишков, И.Н. Кривихин, А.А. Щобак // ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет". № 2015128402/07; заявл. 13.07.2015; опубл. 20.05.2016, Бул. № 14.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕТОКОМ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА НЕОДНОРОДНОЙ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ

В сложных неоднородных электрических сетях с различными классами напряжения при увеличении передаваемой мощности происходит перегрузка участков сети с более низким эквивалентным сопротивлением и существенная недогрузка элементов с большим эквивалентным сопротивлением. Такая ситуация возникает, когда сеть с меньшим номинальным напряжением шунтируется линиями электропередач с большим номинальным напряжением [1].

Для недопущения возникновения перегрузок оборудования для управления перетоком активной мощности в неоднородной электрической сети предлагается комбинированное устройство управления перетоком активной мощности нового типа в виде электромеханической вставки переменного тока (ЭВПТ) с автотрансформатором. Схема предлагаемого устройства представлена на рис. 1.

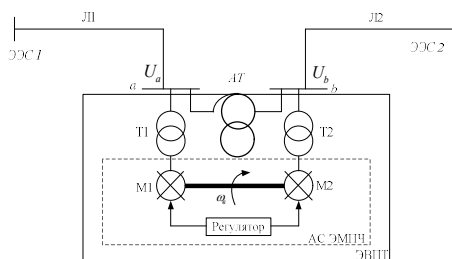


Рис. 1. Комбинированное устройство управления перетоком мощности с ЭВПТ и автотрансформатором

Исследование заключается в проведении расчетов установившихся электрических режимов для тестовой схемы для различных значений перетока мощности в контролируемом сечении сложной неоднородной электрической сети. Произведена оценка влияния рассматриваемого устройства управления мощностью на величину передаваемой в сечении мощности и режимные параметры электрической сети.

Показано, что применение устройства управления перетоком активной мощности на ЭВПТ, включенного параллельно силовым автотрансформаторам подстанции, позволяет повысить предел пропускной способности сети за счет перераспределения мощности в неоднородной электрической сети.

Литература

1. Зеленохат Н. И. Повышение эффективности управления режимами гибкой межсистемной связи с электромеханической вставкой переменного тока // Вестник МЭИ. 2005. №3. С. 66—73.

М.И. Халиков, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ СХЕМЫ СЕТИ

Проблема определения чувствительных узлов играет важную роль в вопросах нарушения статической устойчивости энергосистем.

Узлы и ветви схемы сети, для которых параметры режима реагируют в наибольшей степени на изменения в топологии схемы сети, параметров ее составных элементов и нагрузок, названы сенсорными (чувствительными). В сенсорных узлах параметры режима быстрее достигают допустимых значений, что может привести к нарушению статической устойчивости установившегося режима системы.

Жесткость узловых точек ЭС характеризуется для узла величиной прироста нагрузки, при котором величина или фаза напряжения в ней изменяются на единицу. Чем больше этот прирост, тем больше жесткость ЭС в этой точке [1].

Коэффициент жесткости узла по напряжению и фазе определяется соответственно отношением изменения фазы напряжения к приросту активной мощности нагрузки и отношением изменения величины напряжения к приросту реактивной мощности.

Расчитанные коэффициенты жесткости для схемы с шестью узлами и двумя уровнями напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты жесткости узлов схемы сети

U, кВ	Коэф.	1	2	3	4	5	6
220	k_U	-	0,057	-	-	-	-
	k_δ	-	0,017	-	-	-	-
110	k_U	0,161	-	0,154	0,186	0,197	0,236
	k_δ	0,077	-	0,071	0,083	0,083	0,112

В сети 110 кВ наиболее жестким является узел 3, а наименее жестким - узел 6. При анализе статической аperiodической устойчивости наибольший интерес будут представлять наименее жесткие узлы. При утяжелении режима предел по статической устойчивости в них будет минимальным.

Перспектива применения данной разработки заключается в возможности автоматизированного поиска наиболее сенсорных и жестких узлов схем при оценке статической устойчивости и в расчетах режимов. Это позволит сравнивать схемы разной степени жесткости по предельным потокам и уровням напряжения.

Литература

1. Савоськин Н.Е. Надежность электрических систем. Пенза: ПГУ, 2004.

И.А. Шипова, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ КОМПАКТНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Основными задачами электроэнергетики в настоящее время является повышение эффективности и управляемости энергосистем. Особое внимание уделяется линиям электропередач высокого напряжения, где должна обеспечиваться максимальная пропускная способность с минимальной площадью отчуждения для строительства. В большинстве случаев традиционные технологии в области передачи и распределения электроэнергии исчерпали себя, и дальнейшее успешное развитие может быть осуществлено с помощью новых технических решений с применением современных устройств на базе силовой электроники.

В частности, АО «НТЦ ФСК ЭЭС» рассматривает возможность создания воздушных линий (ВЛ) компактного исполнения с минимальными допустимыми расстояниями между фазами и оптимальной конструкции расщепленной фазы в сочетании с устройствами FACTS, обеспечивающими повышение управляемости.

Отметим, что в ЭЭС России с 1993 г. функционирует компактная ВЛ 330 кВ Псковская ГРЭС — НовоСокольники протяженностью 146,7 км [1].

За рубежом также нашли применение компактным ВЛ с уменьшенными расстояниями между фазами для разных классов напряжения. При этом повышение пропускной способности обеспечивается не за счет оптимизации конструкции фазы, а за счет применения неуправляемых устройств продольной компенсации в сочетании с регулируемыми устройствами поперечной компенсации типа СТК, СТАТКОМ.

В настоящей работе выполнено сопоставление зарубежного подхода с подходом, предложенным АО «НТЦ ФСК ЭЭС» на основании расчетов установившихся режимов, применительно к ВЛ 220 кВ одноцепного и многоцепного исполнения.

Исследование режимов работы протяженных компенсированных ВЛ проводятся с целью поиска оптимальных вариантов повышения пропускной способности для конкретных исходных данных (протяженность, наибольшая передаваемая мощность линии). Полученные результаты позволяют дать рекомендации к выполнению проектных разработок по исполнению новых или по реконструкции существующих линий электропередач напряжением 220 кВ.

Литература

1. **Рыжов Ю. П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОТЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 220 кВ С КОМПАКТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ

Строительство воздушных линий компактного исполнения становится все более востребованным [2]. За счет применения воздушных линий с компактной конструкцией в сочетании с современными управляемыми техническими средствами, можно достигнуть увеличения пропускной способности в 1,2—1,6 раза по сравнению с традиционными передачами [1]. На территории Российской Федерации эксплуатируются воздушные линии и силовое электрооборудование классов номинального напряжения, относящихся к двум исторически сложившимся системам: 10/220/500 кВ и 150/330/750 кВ. Пропускная способность обычных ВЛ 220 кВ, оцениваемая по натуральной мощности, примерно в 7 раз ниже, чем у ВЛ 500 кВ[3]. Поэтому для передачи наибольших мощностей в диапазоне от 400 до 600 МВт приходится сооружать ВЛ 500 кВ, работающие затем недогруженными с повышенными напряжениями. В этой ситуации становится актуальным проектирование, сооружение и освоение ВЛ 220 кВ повышенной пропускной способности [2].

В исследовании была проведена серия расчетов оптимизационного характера для выявления наиболее выгодных характеристик сочетания работы устройства продольной компенсации (УПК) с управляемыми шунтирующими реакторами (УШР). Рассмотрены также экологические аспекты применения воздушных линий компактного исполнения.

Проведенное исследование показывает, что применение продольной емкостной компенсации совместно с управляемыми шунтирующими реакторами позволяет увеличить предельную протяженность линии 220 кВ компактного исполнения с 400 до 600 км и увеличить передаваемую мощность при трех-, четырехцепном исполнении до 450-600 МВт, не переходя на более высокий класс напряжений с учетом необходимых технических ограничений.

Литература

1. **Макарова Л.** Компактные ВЛ: качественно, надежно, экономно // Воздушные линии. 2012. № 2.
2. **Компактные** воздушные линии электропередачи / Коллектив авторов ФСК ЕЭС // [Электронный ресурс]. URL: http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/compact_power_line
3. **Повышение** эффективности электросетевого строительства / А.А. Зевин, К.П. Крюков, А.И. Курносов и др., под ред. Н.Н. Тиходеева/ Л.: Энергоатомиздат, 1991.

*М.Е. Щербаков, студ.; рук. Д.Н. Дадонов, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)*

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ПРИМЕРЕ БАЛАКОВСКОЙ АЭС

Обеспечение динамической устойчивости (ДУ) генерирующего оборудования электростанций при нормативных возмущениях является одним из основных принципов управления режимами электроэнергетических систем [1].

В настоящее время на Балаковской АЭС (установленная мощность 4000 МВт, 4 блока по 1000 МВт каждый) установлена противоаварийная автоматика (ПА), предназначенная для предотвращения нарушения ДУ – автоматика разгрузки при затяжных коротких замыканиях (АРЗКЗ-220, АРЗКЗ-500), которая действует на отключение блоков [2]. Управляющие воздействия на отключение блоков позволяют обеспечить ДУ, но связаны с финансовыми потерями от недоотпуска электроэнергии.

С помощью программно-вычислительного комплекса «EUROSTAG» был произведен анализ ДУ блоков Балаковской АЭС при нормативных возмущениях II и III групп в сети 220 и 500 кВ [3, 4], и определены случаи ее нарушения.

Для выявленных случаев нарушения ДУ в сети 220 и 500 кВ была показана эффективность применения кратковременной импульсной разгрузки турбинблоков Балаковской АЭС [5], что позволит снизить вероятность отключения блоков при нормативных возмущениях и снизить финансовые потери от недоотпуска электроэнергии.

Литература

1. **Иофьев Б.И.** Автоматическое противоаварийное управление мощностью энергосистем. М: Энергия, 1974.
2. **Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окун А.А.** Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
3. **Методические** указания по устойчивости энергосистем // Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. Москва. 2003.
4. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 455 с.
5. **Автоматическое** противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. // Приказ ОАО «СО ЕЭС» от 19.04.2011 №102. Москва, 2011.

А.А. Юдина, Н.В. Сенько, студенты; рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Активное внедрение интеллектуальных электрических сетей предъявляет новые требования к математическим моделям режимов электроэнергетических систем (ЭЭС). Одним из этих требований является разработка новых алгоритмов оценки запасов статической устойчивости (СУ) при вероятностном изменении параметров режимов.

В работе [1] получены уравнения предельных режимов (УПР) и доказано, что надежное функционирование ЭЭС может быть обеспечено при условии, что гиперэллипсоид рассеяния $DY^T S^{-1}DY - C_L^2 = 0$ с центром в точке MY не будет иметь общих точек с поверхностью предельных режимов. Авторами была разработана компьютерная модель в среде Mathcad для анализа СУ в стохастической постановке, отвечающая сети 110 кВ, питающей два узла нагрузки, оснащенных установками распределенной генерации (РГ) и проведены исследования для тестовой трехузловой схемы. Результаты расчета параметров предельных режимов, которые были получены при различных значениях σ , значения C_L , отвечающие гиперэллипсоиду, величины R_{SAU} , определяющие вероятностные оценки риска нарушения САУ: $R_{SAU} = \exp(DY_L^T S^{-1}DY_L^T) = \exp(C_L^2)$, сведены в табл. 1. Разработана математическая модель определения запасов САУ ЭЭС в стохастической постановке. Полученная модификация УПР позволила осуществлять поиск в направлении утяжеления, отвечающем максимальному риску нарушения устойчивости. Полученные результаты доказали применимость разработанных методов в задачах эксплуатации ЭЭС, стохастический алгоритм оценки запасов СУ можно использовать в задачах оперативного управления современными ЭЭС, оснащенными установками РГ.

Таблица 1

Зависимость параметров предельного режима от среднеквадратичного отклонения σ мощностей нагрузок

$\sigma, \%$	C_L , о.е.	R_{SAU} , %	$y_{L1}^{(s)}$, МВт	$y_{L2}^{(s)}$, МВт	Z, %
30	2,5	4,4	-276,00	-241	62,55
40	1,9	16,4	-278,00	-239	62,19

Литература

1. Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИРГУПС, 2012. 236 с.

Секция 51

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент Г.В. Шведов

Секретарь секции — к.т.н., ст. преподаватель

С.А. Фахриева

*А.А. Ефимов, студ.; рук. В.И. Полищук, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Общая потеря электроэнергии складывается из двух частей: номинальных потерь, которые определяются условиями работы при номинальных режимах и оптимальном выборе параметров системы электроснабжения, и дополнительных потерь, обусловленных отклонением режимов и параметров от номинальных значений.

Одним из способов, позволяющим улучшить технико-экономические характеристики энергосистемы является использование накопителя энергии способного покрывать пиковые нагрузки. Одним из эффективных типов накопителя энергии для автономной энергосистемы является электро-механический накопитель (ЭМН). Электро-механический накопитель обладает рядом достоинств по сравнению с другими типами накопителей: высокие технические характеристики и относительная простота практической реализации [1].

Электро-механический накопитель (ЭМН) в общем случае состоит из двух основных элементов: аккумулирующего элемента (маховика) и электрической машины. Потребляя электроэнергию из сети, электрическая машина преобразует электрическую энергию в механическую, которая запасается во вращающемся маховике. При отдаче энергии в сеть электрическая машина преобразует механическую энергию, запасенную в маховике, в электроэнергию.

При исследовании было выявлено, что использование накопителя в составе автономной энергосистемы позволит улучшить качество электро-

энергии, уменьшить расход топлива дизеля, снизить капитальные затраты и эксплуатационные расходы на дизель – генераторный агрегат, что свидетельствует о том, что ЭМН является весьма эффективным средством экономии и распределения электроэнергии в автономной энергосистеме [2].

В перспективе возможно использование данного агрегата в качестве двигателя для резервного или дополнительного насоса.

Литература

1. **Накопители энергии** / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. М.: Энергоатомиздат, 1991.

2. **Бут Д.А., Богданович Е.Г.** Электромеханические преобразователи энергии для энергетических установок ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1989.

А.А. Чегодаев, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРИЧИН ПЕРЕБОЕВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Сложнейшим временем года для энергетиков является осенне-зимний период (ОЗП). Он оказывает значительное влияние на работу энергосистемы России, так как с наступлением холодного времени года потребление электрической энергии возрастает на 10—30 % [1]. При этом, несмотря на подготовительные работы электроэнергетических компаний, систематически возникают перебои в электроснабжении потребителей.

При анализе публичных отчетов ОАО «МОЭСК» [2] о прохождении ОЗП за 2013-2015 годы было рассмотрено 17024 технологических нарушений, произошедших в сетях 0,4—220 кВ. Основными причинами перебоев в электроснабжении потребителей являются:

- перегрузка линий и трансформаторов (2833 технологических нарушений);
- повреждения во внутренней системе электроснабжения абонентов (1592 нарушения);
- естественный износ элементов электрической сети (2836 нарушений);
- воздействие окружающей среды (736 нарушений), в том числе: переход уличной температуры через нулевую отметку, образование больших масс гололеда в пролетах высоковольтных линий электропередач, сильные ветра, перекрытие на животных/птиц;
- пробой изоляции из-за сильного загрязнения элементов, утечка изоляции (масла) и неисправности релейной защиты и автоматики (РЗА) (312 тех. нарушений);
- постороннее воздействие (877 нарушений);
- техническая неисправность оборудования, в том числе заводские дефекты (4674 нарушений).

Как видно из представленных результатов, для обеспечения бесперебойности электроснабжения целесообразно в ближайшее время разработать:

- методику определения очередности обновления электрооборудования;
- новые подходы в обеспечении резервов (сетевых и автономных).

Литература

1. **Григорьев Л.М.** Динамика потребления электроэнергии как индикатор экономической активности // Бюллетень социально-экономического кризиса. (<http://ac.gov.ru/files/publication/a/7945.pdf>)
2. **Итоги** прохождения ОАО «МОЭСК» ОЗП 2013-2015 гг. [Электронный ресурс]. IRL: <http://www.moesk.ru/>

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Движущая сила прогресса — это производство различных материальных благ, создающихся в процессе труда, в котором человек использует энергию природы. Одна из основных проблем использования энергии — это ее передача. Производство электроэнергии с помощью первых батарей, а затем на основе явления электромагнитной индукции и ее передача на большие расстояния произвели революцию в промышленности.

Для оценки основных этапов развития силовых электрических кабелей потребовалось провести глубокий анализ источниковедческой базы, включающей в себя более 50 изданий и архивных материалов. Данная тема интересна тем, что история помогает всесторонне раскрыть техническое содержание изучаемого объекта, определить его параметры, эффективность, производительность и дальнейшее направление развития.

Первые кабели представляли собой медную жилу с изоляцией из шелка, пропитанной церезином [1] — материалом, который используют в кабельной промышленности до сих пор. Позднее стали применять гуттаперчу. Наибольшую популярность получила бумажно-пропитанная [2] изоляция. В России, например, в Санкт-Петербурге, на некоторых участках электрических сетей до сих пор эксплуатируются кабели с бумажно-пропитанной изоляцией, проложенные еще в конце XIX в., т. е. более 100 лет назад [3]. Такая долгая служба возможна только при соблюдении определенных условий эксплуатации, например, температурных, а также при проведении профилактических мероприятий. Поэтому в 70-х годах XX века при производстве изоляции для кабелей стали большее предпочтение отдавать пластмассам, так как производство такой изоляции намного проще быстрее. В наши дни кабельная промышленность не стоит на месте: активно развиваются газоизолированные кабели и сверхпроводники.

Литература

1. **Robert M. Black** The history of electric wires and cables // IEEE history of technology. 1983. 290 p.
2. **Журнал** «Электричество». № 9. Санкт-Петербург: Типография А. Веллинга, 1894.
3. **Голубцова В.А.** История и перспективы развития электроизолирующих материалов, электрических машин, аппаратов, проводов и кабелей. М.: Институт истории естествознания и техники Академии наук СССР, 1955.

Секция 52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

*Председатель секции — зав. каф. ЭС, к.т.н.,
профессор Ю.П. Гусев*

Секретарь секции — к.т.н., ст. преподаватель А.А. Антонов

А.Д. Андрюхин, студ.; рук. О.Ю. Гусев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОТКЛЮЧАЮЩИХ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

При строительстве и реконструкции энергообъектов задача проектирования собственных нужд (СН) 0,4 кВ сопоставима по объемам с проектированием высоковольтной части и неуклонно усложняется [1]. Многообразие стандартов организаций (СТО), регламентирующих проектирование СН, требует отдельного подхода для каждой организации, что приводит к дальнейшему увеличению затрат на проектирование энергообъектов в целом. На кафедре «Электрические станции» были разработаны проекты СТО по выбору кабельных линий и защитных аппаратов в сетях СН 0,4 кВ для ПАО «РЖД», ПАО «ФСК ЕЭС», ведется работа над стандартами для других организаций.

Стандартизация требований и типизация проектных решений СН позволяет в значительной степени автоматизировать процесс проектирования, что может привести к уменьшению затрат и сроков проектирования СН, а также к повышению качества проектных решений.

Целью данной работы является автоматизация процесса выбора защитных аппаратов в СН 0,4 кВ. Эта задача может быть разбита на две основные подзадачи: алгоритмизацию процесса выбора в соответствии с действующими стандартами и создание базы данных оборудования. В работе сформулированы основные требования, предъявляемые к базе данных, разработан алгоритм выбора защитных аппаратов по описанной в СТО ПАО «РЖД» методике. Алгоритм предполагает синтез вариантов решений [2], отсеечение вариантов по критериям термической стойкости и невозгораемости кабельных линий, чувствительности и селективности выключа-

телей, а также выбор оптимального варианта с учетом дополнительных критериев, задаваемых проектировщиком.

Также разработано программное обеспечение, реализующее разработанный алгоритм, позволяющее в полуавтоматическом режиме осуществлять выбор защитных аппаратов и формировать отчет по результатам работы, что значительно сокращает затраты и сроки проектирования, а также снижает вероятность появления ошибок.

Литература

1. **Короткие** замыкания и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крюčkова, В.А. Старшинова. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

2. **Клир Д.** Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990.

Д.А. Барышников, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГТУ-ТЭЦ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В настоящее время в электроэнергетике значительное внимание уделяется строительству небольших по мощности (до 30 МВт) электростанций в непосредственной близости к потребителю, часто с использованием принципа когенерации [1].

При проектировании таких электростанций актуальной задачей является обеспечение их повышенной надежности, особенно при авариях в энергосистеме. Одним из способов повышения надежности может быть установка на электростанции независимого энергоисточника, позволяющего обеспечить питание потребителей собственных нужд (с.н.) и запустить электростанцию после аварии «с нуля».

В электроэнергетике находят применение следующие способы пуска газотурбинных установок (ГТУ) в послеаварийных условиях:

- применение аварийных дизельных электростанций необходимой мощности, обеспечивающих питание потребителей с.н. энергоблока ГТУ и его запуск;
- отключение энергоблока ГТУ при аварии в энергосистеме и автоматическое выделение потребителей с.н. электростанции (АВСН) для питания их от выделенного генератора газовой турбины [2].

Для оценки возможности использования режима АВСН необходимо:

- определить мощность трансформатора с.н., необходимую для обеспечения питания потребителей с.н. электростанции в режиме АВСН;
- провести координацию тока КЗ в режиме АВСН с параметрами электрооборудования.

В работе проведена оценка повышения надежности ТЭЦ с энергоблоками ГТУ мощностью 32 МВт. Выбрана мощность трансформатора с.н., позволяющая обеспечить электроснабжение потребителей в режиме АВСН. Выполнен расчет тока КЗ, позволяющий оценить возможность использования раннее выбранного и установленного электротехнического оборудования.

Литература

1. **Жуков В.В.** Электрическая часть электростанций с газотурбинными и парогазовыми установками: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
2. **Александров А.С., Жуков В.В., Кузьмичев В.А.** О некоторых проблемах надежности и живучести электростанций с парогазовыми и газотурбинными установками // Энергетик. 2012. № 12. С. 35—39.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОНИТОРИНГА НА ПОДСТАНЦИЯХ МОНГОЛИИ



Рис. 1. Срок эксплуатации оборудования различных ТЭЦ энергосистемы Монголии

Электроэнергетика Монголии начала развиваться с 1940 года. Объем производства электроэнергии Монголии на сегодня составляет около 950 МВт·ч. По прогнозам, потребление электроэнергии Монголии к 2020 году будет составлять 1400 МВт·ч, а к 2025 году — 2000 МВт·ч. Изучение материалов по состоянию электрооборудования энергосистемы Монголии показало, что серьезной проблемой является большая изношенность эксплуатируемого оборудования. Авторами была проведена систематизация информации об эксплуатируемом оборудовании на теплоэлектроцентралях. Как видно из рис. 1, на ряде электростанций, кроме ДзТЭЦ, срок службы электрооборудования превышает нормативный — 25 лет, на ТЭЦ-2 и ДарТЭЦ — более чем в 2 раза. Как показывает опыт эксплуатации, существующий контроль оборудования недостаточен. За период с 2010 по 2015 г. регистрировались аварии с серьезными последствиями. Для своевременного определения дефектов предложено внедрить систематический тепловизионный контроль [1]. Климат Монголии характеризуется резкими изменениями суточных температур. Это может приводить к появлению неожиданных дефектов (например, ослабление контактов). Поэтому в настоящее время проблема диагностического контроля электрооборудования является актуальной задачей для энергосистемы Монголии. Предлагаемый метод тепловизионного контроля, по сравнению с другими современными методами является наиболее подходящим и малозатратным.

Результаты исследования можно использовать для решения проблем технической эксплуатации и мониторинга на подстанциях. Определение дефектов, степени износа и старения оборудования повысит надежность энергосистемы в целом.

Литература

1. Минеев В.Ф. Эксплуатационный контроль и техническая диагностика высоковольтного электрооборудования. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ КАБЕЛЕЙ В ЦЕПИ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА ГТУ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

При встраивании распределенной генерации малой мощности в существующие электрические сети возникает ряд проблем: обеспечение термической стойкости кабеля, динамической устойчивости генератора, механической прочности газотурбинной установки (ГТУ). Это связано с тем, что в существующих участках сети релейная защита настроена на распределение энергии, и ее настройка не учитывает наличие в сети источников электрической энергии.

При КЗ в смежном участке электрической сети угол между ЭДС генератора и ЭДС системы будет увеличиваться, а в обмотке статора возникнет бросок тока. После отключения КЗ и сохранения динамической устойчивости генератора с системой в цепи статора может возникнуть значительный повторный бросок тока. Изменение во времени значения тока в цепи статора генератора при КЗ в смежном участке сети и после его отключения представлен на рис. 1.

Расчеты показывают, что при отключении КЗ за время больше допустимого по условию термической стойкости бросок тока может быть сопоставим с броском тока в момент КЗ. Это может привести к нарушению термической стойкости кабеля в цепи статора и нарушению механической прочности ГТУ в целом. Существующие методики выбора кабелей и их проверки по термической стойкости повторного броска тока не учитывают.

В исследовании разработаны критерии оценки термической стойкости кабеля в цепи ГТУ малой мощности с учетом дополнительного тепловыделения в кабеле, возникающего после отключения КЗ в смежном участке электрической сети. Исследование проводится с помощью метода математического моделирования в программном комплексе *EMTP-RV*. В модели учтены влияющие факторы: тип нагрузки, жесткость связи генератора с системой, удаленность КЗ, влияние автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и автоматического регулятора частоты и мощности (АРЧМ) ГТУ.

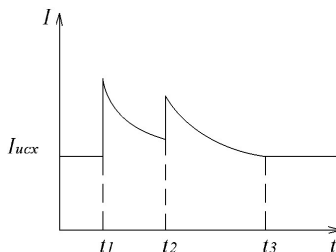


Рис. 1. Характер изменения во времени значения тока в цепи статора генератора при КЗ в смежном участке сети и после его отключения: $I_{исх}$ — значение тока в цепи статора до КЗ, t_1 — момент КЗ, t_2 — момент отключения КЗ, t_3 — момент возврата тока якоря к установившемуся значению

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫБОРА ОТКЛЮЧАЮЩИХ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Увеличение номенклатуры предохранителей и автоматических выключателей, применение защитных аппаратов иностранного производства, а также современный темп развития средств проектирования требуют разработки информационного обеспечения для выбора защитных аппаратов, одним из важных элементов которого являются базы данных защитных аппаратов.

В данной работе рассмотрены вопросы аппроксимации характеристик плавких предохранителей, разработана структура базы данных для автоматических выключателей и предохранителей, а также внесена в базу данных информация о большинстве современных автоматических выключателей и плавких предохранителей.

В базе данных собраны технические данные защитных аппаратов, необходимые для выбора плавких предохранителей и автоматических выключателей для конкретных цепей, учитывая класс напряжения, номинальный ток, ток отключения, частоту, количество полюсов, назначение цепей [1]. Разработанная база данных включает в себя времятоковые характеристики плавких предохранителей и автоматических выключателей, представляющие собой зависимость времени отключения защитного аппарата от тока с учетом разброса по времени отключения. Времятоковая характеристика обычно задается графически [2]. Это затрудняет их использование в системах автоматизированного проектирования и усложняет построение карт селективности. Для ряда предохранителей разработаны математические модели для аппроксимации времятоковых характеристик. Структура базы данных позволяет хранить времятоковые характеристики как в виде множества точек, так и в виде функций времени, зависящих от тока и других параметров, таких как уставки расцепителей.

Разработанная информационная модель позволит ускорить построение карт селективности и автоматизировать выбор и проверку защитных аппаратов по чувствительности.

Литература

1. **ГОСТ Р 50345-2010 (МЭК 60898-1:2003)**. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Автоматические выключатели для переменного тока.
2. **IEC 255-8:1990** Thermal Electrical Relays, Electrical Relays.

Ю.А. Бурлов, студ.; рук. А.А. Антонов, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6 – 220 КВ

При проектировании современных трансформаторных подстанций (ТП) требуется минимизировать затраты на их сооружение и последующую эксплуатацию в течение всего срока службы. В настоящее время электросетевые компании в основном применяют комплектные блочные и модульные подстанции [1], поставляемые к месту установки в состоянии высокой заводской готовности, однако такой выбор зачастую трудно обосновать экономически.

Современные комплектные ТП (КТП) являются малообслуживаемыми из-за увеличения надежности применяемого в них электрооборудования. Для дистанционного контроля и управления современные КТП могут иметь устройства телемеханики и телеуправления. Современные КТП, по сравнению с традиционными ТП, имеют дополнительные системы собственных нужд (СН), такие как система климат-контроля, электропитания микропроцессорной техники, система электромагнитных блокировок, система связи, система телемеханики и телеуправления. Дополнительные системы СН ТП обуславливают увеличение расхода электроэнергии на собственные нужды.

В рамках работы проведено технико-экономическое сравнение вариантов ТП традиционного и современного исполнения по показателю дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию в течение срока службы (30 лет), проанализированы статьи доходной и расходной части затрат. При использовании современных КТП блочного и модульного типа снижаются затраты на землеотвод, монтаж, пуско-наладку и текущее обслуживание. Применение на КТП современного оборудования вызывает рост капитальных затрат, а также увеличение издержек на компенсацию электроэнергии, потребляемой на СН ТП. В итоге установлено, что современные ТП по сравнению с традиционными имеют в среднем в 1,5 – 2 раза большие капитальные затраты на сооружение, однако характеризуются меньшими на 10 – 15% ежегодными издержками на эксплуатацию.

Литература

1. **Киреева Э.А., Цырук С.А.** Современные комплектные трансформаторные подстанции и распределительные устройства напряжением 6(10) – 35/0,4 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007.

С.С. Васильев, А.С. Иванников, студенты;
рук. А.М. Поляков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТУРБОАГРЕГАТА ДЛЯ СРЕДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

В последнее время возникли условия для развития отечественного программного обеспечения. Одной из таких разработок является среда *SimInTech*, позволяющая моделировать различные технологические процессы и системы управления. Применительно к энергетике можно разрабатывать, например, программные тренажеры для электростанций, модели для расчета электрических режимов. С этой целью разрабатывается библиотека специализированных математических моделей электрооборудования. Важным объектом моделирования является турбоагрегат, состоящий из моделей синхронного генератора, турбины и системы возбуждения. Требования к модели определяют исходя из режимов, необходимых для моделирования. Например, для тренажера турбогенератора необходима модель, обеспечивающая все режимы работы, тесно сопряженные с технологической частью, такие как пуск, синхронизация, аварийные режимы.

Часто для всережимных моделей применяются упрощенные математические модели синхронного генератора, основанные на системе дифференциальных уравнений Парка-Горева [1, 2], чтобы при расчете обеспечить режим реального времени. В некоторых случаях, например внезапный сброс нагрузки, необходимо учитывать режим насыщения синхронной машины. В этом же случае упрощенное моделирование турбины [1] может привести к завышенным значениям скорости ротора генератора, а значит, необходимы более сложные модели турбины и ее системы управления. Математическая модель турбоагрегата, реализованная в *SimInTech*, включает в себя модель синхронного генератора с демпферными обмотками, с учетом типовой характеристики холостого хода турбогенератора [3], модель турбины и системы возбуждения.

Данную модель можно использовать при разработке различных расчетных программ и тренажеров, а также в лабораторных работах дисциплин по профилю «Электрические станции».

Литература

1. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. 300 с.
2. Bhy Ahmed Ozeer, Guillermo Hernandez-Gonzalez, Tarek H.M. EL-Fouly. Investigation of Planned // Islanding Performance of Rotating Machine-based DG Technologies, March 2012.
3. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. заведений. — 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТАХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ЛЭП 220—750 кВ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА

При выводе в плановый ремонт ЛЭП 220—750 кВ, предварительно отключенной с другого конца, возникают перенапряжения, которые воздействуют на межконтактное пространство дугогасительной камеры элегазовых выключателей. Перенапряжения могут превышать допустимые кратность и (или) скорость переходных восстанавливающихся напряжений (ПВН) на контактах выключателя [1]. Зафиксированы случаи продолжительного горения электрической дуги по внешней поверхности дугогасительных камер элегазовых выключателей, приведшие к разрушению дугогасительных камер и к появлению сколов фарфоровой изоляции. Механизм эскалации ПВН требует исследования.

Целью работы является расчет ПВН при отключении ЛЭП 500 кВ в режиме холостого хода. Разработана расчетная модель в программе *EMTP-RV*, включающая эквивалент системы 500 кВ, отключаемую ЛЭП, высоковольтный выключатель, шунтирующие реакторы и эквивалентную емкость других присоединений 500 кВ и ошиновки распределительного устройства.

В результате получены кривые ПВН на контактах высоковольтного элегазового выключателя (рис. 1). Установлено, что при наличии шунтирующего реактора в начале отключаемой ЛЭП, эквивалентная емкость системы оказывает существенное влияние на ПВН. При значениях емкости $\leq 0,5$ мкФ повышается кратность нормируемого значения ПВН.

Результаты работы могут быть использованы при доработке указаний для оперативного персонала подстанций по последовательности оперативных переключений при выводе ЛЭП 220—500 кВ в ремонт.

Литература

1. СТО 56947007- 29.130.10.095-2011. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору.

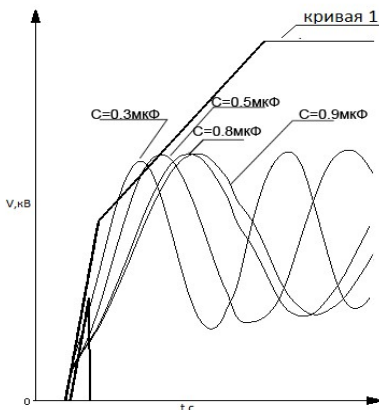


Рис. 1. Влияние емкости присоединений 500 кВ и ошиновки на кратность ПВН на контактах высоковольтного выключателя: кривая 1 — нормируемое значение ПВН

ОГРАНИЧЕНИЕ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Возрастающее потребление электроэнергии в мегаполисах сопровождается увеличением мощности распределенной генерации. Неизбежным следствием такого развития является рост токов короткого замыкания (КЗ), ограничение которых в настоящее время достигается путем применения токоограничивающих реакторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой [1, 2].

Для ограничения уровней аварийных токов предлагается применять токоограничивающий реактор в виде соленоида, каждая фаза которого состоит из сетевой катушки с заполнением внутренней полости магнитопроводом из магнитного материала с прямоугольной петлей гистерезиса (далее ППГ) и обмотки управления. Для магнитных материалов с ППГ характерно наличие «горизонтальных» участков петли гистерезиса, на которых имеют место обратимые процессы перемагничивания.

В нормальном режиме сердечник магнитопровода находится в насыщенном состоянии, поэтому его индуктивное сопротивление мало и не оказывает влияние на параметры электрического режима. В режиме аварийных токов сердечник магнитопровода выходит из насыщения и его индуктивность многократно увеличивается в сотни раз (зависит от значения относительной магнитной проницаемости), что мгновенно ограничивает нарастание аварийного тока без дополнительных коммутаций в цепях управления реактора и возникновения переходных процессов.

Применение токоограничивающего реактора в электрической системе распределенной генерации позволит снизить уровни ударных токов КЗ и улучшить протекание переходных процессов.

Литература

1. **Гольдштейн В.Г.** Современные проблемы электроснабжения мегаполисов: моногр. М.: Энергоатомиздат, 2015.
2. **Ивакин В.Н., Ковалёв В.Д.** Применение токоограничивающих устройств в высоковольтных электрических сетях // Электро. 2009. № 2.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА MATLAB ДЛЯ АНАЛИЗА СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время расчет сложных цепей, содержащих параллельно работающие трансформаторы, не представляет сложностей и производится на ЭВМ численными методами в специализированных программных продуктах. Одним из современных пакетов, реализующих численные методы, является *MATLAB* [1], содержащий множество функций и встроенных пакетов. Одним из таких пакетов является *Simulink*, который имеет множество встроенных блоков для расчета — как линейных, так и нелинейных систем. Однако при моделировании цепей, содержащих параллельно работающие нелинейные трехфазные трансформаторы [2], возникает ряд сложностей, связанных с моделированием электромагнитных полей этих устройств в динамических режимах, особенно несимметричных. Поэтому важной задачей является разработка методов, алгоритмов и программ, легко интегрируемых в *Simulink* и позволяющих использовать его для расчета цепей с параллельно работающими трансформаторами в различных режимах.

На основе анализа аналоговых схем замещения магнитных цепей параллельно работающих трансформаторов разработана математическая модель, позволяющая на каждом шаге численного интегрирования уравнений, описывающих состояние электрической цепи, установить связь между напряжениями ветвей трансформаторов и производными токов этих ветвей через матрицу дифференциальных индуктивностей, элементы которой определяются кусочно-линейным методом Ньютона—Рафсона.

В работе приведены алгоритмы и подпрограмма расчета цепей с параллельно работающими трансформаторами в симметричных и несимметричных режимах, интегрированная в *Simulink*. Приведены результаты расчета различных режимов работы параллельно включенных трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/Y_n .

Предложенная модель является универсальной и позволяет анализировать самые различные режимы при параллельной работе трехфазных трансформаторов с различными схемами соединений обмоток.

Литература

1. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink*. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.
2. **Бошняга В.А.** Моделирование трехфазных трансформаторов для расчета несимметричных режимов работы электрических сетей. // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 1997. №1—2. С. 14—19.

КООРДИНАЦИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЗРЫВНЫХ КОММУТАТОРОВ И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проблема координации токов короткого замыкания (КЗ) является чрезвычайно важной в любой электроэнергетической системе (ЭЭС), так как уровень КЗ определяет требование при выборе оборудования, а, следовательно, определяет экономичность и надежность ЭЭС. Координация токов КЗ осуществляется как путем применения различных токоограничивающих устройств (ТОУ) в фазах электрических сетей — продольное токоограничение, так и изменением связи нейтральной точки электрической сети с заземляющим устройством (режима нейтрали электрической сети) — поперечное токоограничение [1].

В настоящей работе рассматриваются возможности применения устройств, способных быстро реагировать на изменения в сети, а именно отключать или шунтировать поврежденные участки. Это достигается путем использования пиротехнических зарядов во взрывных коммутаторах и способности изменять свое сопротивление в зависимости от температуры в сверхпроводниковых ограничителях тока (СОТ) в процессах продольного и поперечного токоограничения в ЭЭС.

Целью работы является анализ принципов работы и способности к токоограничению устройств CLiP, Is-limiter, СОТ различных исполнений, анализ схемных решений применения этих устройств и последствий применения в различных областях ЭЭС с технической точки зрения [2].

Для достижения основной цели анализа поставлены и решены следующие задачи: разработка плана внедрения с соответствующим технико-экономическим сравнением использования общепринятых методов ограничения ТКЗ и с использованием устройств CLiP, Is-limiter, СОТ; выявление мест и областей целесообразного применения этих устройств в фазах и нейтральных ЭЭС для реализации продольного и поперечного токоограничения соответственно; формирование требований к параметрам устройств с учетом различных факторов.

Литература

1. Елагин П.В. Коммутационные ограничители тока. Новые устройства для защиты электрооборудования // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. 2004. № 4. (28).

2. Глускин И. З. Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем / И.З. Глускин, Г.А. Дмитриева, М.Ш. Мисриханов и др. М.: Энергоатомиздат, 2002. 373 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

На сегодняшний день установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) составляет 64,7 ГВт. При разработке главных электрических схем СЭС необходимо учитывать характеристики генерирующих элементов – фотоэлектрических (ФЭ) модулей. Так, в отличие от синхронных генераторов, токи короткого замыкания (КЗ) ФЭ модулей соизмеримы с токами нормального режима.

Целью работы является адаптация методики выбора защитных аппаратов (ЗА) ФЭ батарей, разработанной Международной электротехнической комиссией (МЭК), путем формализации расчетных условий и уточнения критериев выбора.

В соответствии с [1] защитные устройства от сверхтоков, как правило плавкие предохранители, могут устанавливаться в цепочках или группах ФЭ модулей. Номинальный ток аппарата выбирается в диапазоне от 1,5 до 2,4 тока КЗ модуля. Фактический ток КЗ пропорционален мощности солнечного излучения, зависящего от широты, высоты над уровнем моря, погодных условий и температуры окружающей среды. Например, на широте 49° с.ш. максимальная мощность излучения в летнее время с 9 до 15 составляет 0,6 кВт/м² [2]. При числе параллельных цепочек батареи не более 5 обратный ток КЗ в поврежденной цепочке составит не более 2,4 тока КЗ модуля. Предохранитель с тем же номинальным током не сработает и не сможет локализовать КЗ. ФЭ батарея будет продолжительно находиться в режиме КЗ.

В зависимости от расчетных условий, при возникновении сверхтока в ФЭ батарее, возможны случаи несрабатывания ЗА, номинальный ток которого выбран в диапазоне согласно [1]. Выбор номинального тока защиты необходимо производить с учетом расчетных условий, соответствующих географическому положению проектируемой СЭС. В данной работе произведен анализ методики выбора ЗА ФЭ батареи, позволяющий сократить диапазон выбора номинального тока аппарата, исключить возможность протекания обратного сверхтока в течение длительного времени и обеспечить отсутствие снижения мощности СЭС.

Литература

1. **IEC 62548-2016.** Photovoltaic (PV) arrays - Design requirements.
2. **PVCDROM.** [Электронный ресурс]. Дата обновления: 19.9.2011. URL:<http://pveducation.org/pvcdrom/calculation-of-solar-insolation> (дата обращения: 10.09.2016).

М.М. Закаржаев, асп.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 20 кВ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА

В последние годы в г. Москве интенсивно строилась и вводилась в эксплуатацию электрическая сеть сравнительно новой для нашей страны ступени напряжения – 20 кВ. Появление нового класса напряжения в Московской энергосистеме было вызвано в первую очередь интенсивным увеличением электропотребления и ростом плотности нагрузок. На 16.12.2015 мощность электрических нагрузок составила 16498 МВт.

На 2016 год в Москве уже построено более 20 центров питания с напряжением 220/20 кВ и 110/20 кВ, собственниками которых являются: АО «ОЭК», АО «Энергокомплекс» и ПАО «МОЭСК».

Оценка пропускной способности КЛ 20 кВ определялась на основании фактических условий прокладки кабельных трасс. Исследованы были условия прокладки двух цепей КЛ 20 кВ Мещанская — Первомайская, выполненной с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) длиной 22,2 км. Были проведены расчеты для участка с наихудшими условиями теплоотвода, а именно на участке, проложенном методом горизонтально направленного бурения (ГНБ) в трубах из полиэтилена низкого давления (ПНД) с максимальной глубиной залегания 19,2 м.

Расчеты показали [1, 2], что допустимая токовая нагрузка снижается более чем в два раза и составляет 44 %. Поэтому, при обосновании и выборе параметров КЛ, необходимо принимать во внимание значительное снижение пропускной способности КЛ в реальных условиях прокладки.

Таким образом, для предотвращения перегрузок в аварийных режимах при отключении одной из цепей, необходимы мероприятия по увеличению сечения кабеля, либо по увеличению числа цепей КЛ 20 кВ.

Построение сети 20 кВ производится с низкоомным резистивным заземлением нейтрали, что тоже является новым решением для распределительных сетей России. В связи с этим, возникает необходимость проведения анализа зависимости пропускной способности КЛ 20 кВ от выбора сечения экрана и схем заземления экранов кабельных линий.

Литература

1. **ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009.** Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчетов номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Общие положения.
2. **ГОСТ Р МЭК 60287-2-1-2009.** Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления.

ПОМЕХИ, НАВОДИМЫЕ ИЗ КОНТУРА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ В СИСТЕМУ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

Защита вторичных цепей на электрических подстанциях от действия помех является одной из наиболее актуальных проблем надежности энергообъектов. В нашей стране эта проблема особенно актуальна из-за значительных, по сравнению с зарубежными показателями, распределенных емкостей системы оперативного постоянного тока (СОПТ) относительно земли. Контрольные кабели на крупных подстанциях проходят по территории открытых распределительных устройств (РУ) и, следовательно, находятся в зоне с жесткой электромагнитной обстановкой. Они часто оказываются передатчиками электромагнитных помех от РУ объекта к микропроцессорной аппаратуре устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) [1].

Влияние сильных электромагнитных полей, особенно высокочастотных, способно наводить помехи во вторичных цепях. В настоящее время активно обсуждается вопрос возможности заземления СОПТ различными способами. В случае заземления СОПТ помехи из контура заземления могут попадать в устройства РЗА напрямую, через гальваническую связь [2].

В рамках работы проведено экспериментально-аналитическое исследование возможных способов заземления СОПТ и оценено влияние помех, возникающих на заземляющем устройстве подстанции и оказывающих воздействие на работу микропроцессорных релейных защит. С этой целью разработана математическая модель СОПТ с использованием программы *EMTP-RV*, сочетающая в себе элементы микропроцессорной релейной защиты, элементы заземляющего контура и источники помех. Модель позволяет исследовать влияние на СОПТ помех различной природы.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы при проектировании СОПТ подстанций, а также для уменьшения числа ложных срабатываний релейных защит.

Литература

1. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Томск: Издательство ТПУ, 2007.
2. ITC-T K104. Method for identifying the transfer potential of the earth potential rise from high or medium voltage networks to the earthing system or neutral of low voltage networks. 2015.

Н.А. Лагутин, асп.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

В настоящее время, в связи со значительным износом электрооборудования в энергосистемах, актуальной является проблема разработки рекомендаций по усовершенствованию диагностики гидрогенераторов. Задачи разработки рекомендаций по усовершенствованию системы диагностики теплового состояния гидрогенераторов требует более широкой экспериментальной базы, охватывающей как можно больше гидрогенераторов различных типов и мощностей. Учитывая индивидуальное исполнение гидрогенераторов для каждой ГЭС, в ходе решения данных задач необходимо помимо теплового состояния статора гидрогенератора [1], рассматривать и тепловое состояние ротора. В связи с этим было проведено составление расширенной базы данных тепловых испытаний, в которую вошли результаты, полученные экспериментально с участием автора и собранные за последние 2 года для гидрогенераторов типов ВГС-700/100-48, СВ-1243/165-96, СВ-1343/140-96, СВ1-1500/200-88, СВ-1130/220-44. В качестве примера в табл. 1 приведены данные по гидрогенератору СВ-1343/140-96.

Таблица 1

Тепловое состояние гидрогенератора СВ-1343/140-96:

Номер ГГ	Температура обмотки (меди) статора, °С	Температура сердечника (стали) статора, °С	Температура обмотки (меди) ротора, °С
1	76 (41)	73 (38)	86 (51)
4	82 (47)	82 (47)	96 (61)
5	82 (47)	80 (45)	93 (58)

Примечание: В скобках указано превышение температуры обмоток статора и ротора, сердечника статора над температурой охлаждающего воздуха, принятой 35°С.

Эти данные предполагается использовать для уточнения и проверки разрабатываемых рекомендаций к действующей методике [2] по проведению испытаний на нагревание, а также для математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в гидрогенераторе.

Литература

1. Лагутин Н.А., Жуков В.В. Выбор методики теплового расчета статора гидрогенератора в нормальном режиме // Энергетик. 2015. № 10. С. 50—51.
2. РД 34.45.309-92. Методические указания по проведению испытаний генераторов на нагревание. М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993.

А.Д. Лхамдондог, асп.; Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА РАБОТУ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Изменения вариаций геомагнитного поля Земли во время геомагнитных бурь индуцируют в землегеоиндуцированные (квазипостоянные) токи (ГИТ). В линиях электропередачи большой протяженности и нейтралах заземленных обмоток силовых трансформаторов (СТ) одновременно протекают переменный ток и ГИТ.

При протекании ГИТ по обмоткам СТ возможен процесс насыщения магнитопровода, что влияет на нормальную работу СТ. В частности, смещение рабочей точки на нелинейную часть характеристики кривой намагничивания может приводить к появлению высших гармоник, ложному срабатыванию релейной защиты и автоматики, перегреву трансформатора [1, 2].

Восстановление напряжения на СТ после отключения короткого замыкания и при включении СТ под напряжение при наличии ГИТ приводит к увеличению пускового тока по сравнению с обычными уровнями, превышающими номинальный ток СТ в 6—8 раз. Для предотвращения ложного срабатывания релейной защиты трансформаторов от пусковых токов вводится выдержка времени, либо анализируется дифференциальный ток. Значение постоянной времени затухания пускового тока зависит от мощности СТ.

Для исследования влияния ГИТ на значения пусковых токов в программном комплексе *EMTP-RV* разработана математическая модель участка сети с элементами учитывающими индуцируемые в земле магнитными бурями токи. Результаты исследования позволят количественно оценить влияние ГИТ на переходные процессы, вызванные короткими замыканиями и коммутациями, разработать рекомендации для коррекции уставок релейных защит, что, в свою очередь, повысит надежность работы электрооборудования и электроэнергетических систем в целом.

Литература

1. **Risk analysis of geomagnetically induced currents in power systems/ Rasmus Thørborg**// Division of industrial electrical engineering and automation faculty of engineering, LTH, Lund University, 2012.

2. **Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А.** Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов// Вектор науки ТГУ. 2012. № 3 (21). С. 65—69.

М.У. Магомедов, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРА Т-12-2Э-У3

Исследования динамической устойчивости генераторов необходимы для учета конкретных условий работы электростанции в энергосистеме. Они необходимы для оценки запасов по устойчивости, проверки правильности настройки систем регулирования, для согласования действий противоаварийной автоматики и релейных защит электростанции.

В связи с развитием распределенной энергетики актуальной проблемой является исследование динамической устойчивости турбогенераторов газотурбинных установок (ГТУ) малой мощности.

Исследовать динамическую устойчивость генераторов электростанции в реальных условиях практически невозможно. Эксперименты, например связанные с организацией короткого замыкания (КЗ) на шинах высокого напряжения, весьма рискованные, опасные и дорогостоящие. Они проводятся чрезвычайно редко, в основном в интересах исследования режимов энергосистем[1].

В области исследования динамической устойчивости энергоблока с ГТУ возможно использование следующих способов:

а) аналитическое описание переходных электромагнитных и электро-механических процессов, разработанное на базе фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований;

б) электродинамические модели генераторов, станций и энергосистем, разработанные на базе теории подобия;

в) математические модели генераторов, как правило модели высокого уровня, весьма точные, обладающие широкими возможностями вариации параметров схем и режимов.

В работе выполнено исследование динамической устойчивости энергоблока мощностью 12 МВт. Для этого использована математическая модель турбогенератора в *MATLAB*.

Предел динамической устойчивости генератора определен при трехфазном КЗ вблизи сборных шин высшего напряжения станции. Проведенное исследование отражает процессы в области предела динамической устойчивости генератора с нарушением синхронизма ($\Delta T_{КЗ} \approx 0,33$ с). Допустимая длительность КЗ составила 0,327 с.

Литература

1. Кузнецов Ю.П. Методы расчетов, моделирование и исследование режимов работы электрооборудования тепловых электрических станций и подстанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО 10 кВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

В настоящее время рост нагрузок в распределительных сетях напряжением 10 кВ мегаполисов при ограниченных возможностях ее развития часто приводит к тому, что токи КЗ превышают отключающую способность выключателей.

Разработано токоограничивающее устройство трансформаторного типа (рис. 1), работающее по следующему принципу: при незамкнутой обмотке w_K магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 катушек w_1 и w_2 представляют собой потоки рассеивания, замыкающиеся через воздушный промежуток окна магнитопровода. При возрастании тока вследствие КЗ увеличивается падение напряжения на обмотках w_1 и w_2 , в результате чего возрастает напряжение первичной обмотки реактора, что приводит к отпирианию тиристоров $VD1$ и $VD2$, закорачивающих обмотку w_K . При этом магнитный поток Φ_2 уменьшается, что приводит к уменьшению сопротивления обмотки w_2 , а следовательно, к дальнейшему возрастанию потока Φ_1 , который теперь замыкается по сердечнику. Сопротивление обмотки возрастает пропорционально возрастанию ее индуктивности (от значения индуктивности рассеивания L_S до значения индуктивности намагничивания L_μ) [1].

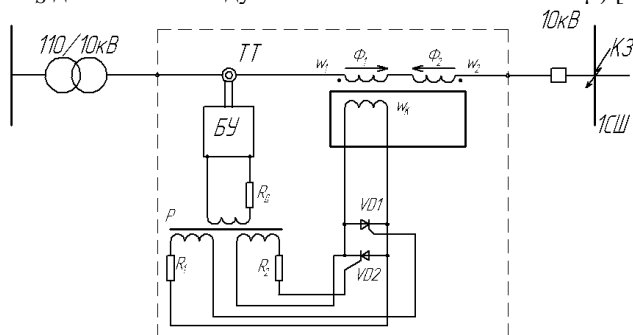


Рис. 1. Схема токоограничивающего устройства

Разработанное токоограничивающее устройство обеспечивает минимальное падение напряжения и потери активной мощности в нормальном режиме.

Литература

1. Дуань Лион. Разработка и исследование квазирезонансных токоограничивающих устройств для линий электропередач. Дисс.... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10 кВ

Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы. Особенно актуальна она для сложных систем, таких как системы электроснабжения, состоящих из большого числа элементов и имеющие обширные внешние и внутренние связи.

В рамках исследования на примере потребителя, в состав нагрузки которого входят крупные синхронные двигатели напряжением 10 кВ, разработаны рекомендации по повышению надежности его электроснабжения. Проведено экспериментально-аналитическое исследование с применением программного комплекса *NEPLAN*. Разработана математическая модель прилегающей сети 110 – 220 кВ, включающая шины, линии электропередачи, коммутационные аппараты и устройства релейной защиты.

Переходные процессы, обусловленные одновременным самозапуском двигателей, например при автоматическом вводе резерва, могут вызывать значительный провал напряжения на шинах подстанции, что в свою очередь может привести к затягиванию пуска и/или срабатыванию защит минимального напряжения и технологических защит [1].

Выполнен анализ осциллограмм, полученных при моделировании прямого пуска электродвигателя. Так, прямой пуск электродвигателя сопровождается 6—8 кратным броском тока, создающим ударный электромагнитный момент, в течение 1,5—2 секунд с начала переходного процесса ударный электромагнитный момент достигает 4-кратного номинального момента электродвигателя [2].

Остаточное напряжение на шинах потребителя может быть повышено посредством применения устройств *FACTS* (гибких систем электропередачи переменного тока). К ним относятся статические тиристорные компенсаторы, продольные статические компенсаторы.

Результаты настоящего исследования предлагается использовать для повышения надежности системы электроснабжения нефтеперекачивающей станции за счет уменьшения числа аварийных отключений ответственных потребителей и исключения ударных пусковых нагрузок.

Литература

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнерг. спец. вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
2. **Сыромятников И.А.** Режимы работы синхронных генераторов. М.: Госэнергоиздат, 1952. 196 с.

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

АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Системы АСУ ТП обеспечивают высокий уровень контроля состояния оборудования ПС, при этом устройствами АСУ ТП генерируется значительный объем сигналов и измерений, правильное применение которых важно для повышения эффективности технологического управления ЕНЭС. Оперативно-технологическая информация (ОТИ) в основном используется для решения задач диспетчерского управления энергосистемой и в основном включает в себя следующие виды данных: перетоки мощности и состояние коммутационных аппаратов (выключателей) по основным присоединениям подстанции, напряжения на секциях шин, частота и обобщенные сигналы срабатывания защит и аварийной сигнализации [1].

В настоящее время на энергообъектах, в частности подстанциях, установлены как устройства телемеханики, так и современное микропроцессорное оборудование. Сбор и передача информации от данных устройств происходит по разным протоколам обмена (МЭК 60870-5-104, МЭК 61850, *Modbus*, *OPC* и др.) и ее объемы значительно отличаются. В связи с этим преобразование протоколов является важной задачей в осуществлении корректной коммуникации между нижним и верхним уровнями.

В качестве примера была организована передача данных о состоянии микросети на автоматизированное рабочее место (АРМ) персонала. Для создания модели системы использовался программный комплекс *DigSILENT PowerFactory*. В качестве устройства для сбора и передачи аналоговых измерений и информации о состоянии оборудования использовался программный модуль *Шлюз Iec104Opc*. Данные из системы в виде *OPC*-переменных поступают в шлюз, где преобразовываются и по протоколу МЭК 60870-5-104 передаются в SCADA систему.

В процессе анализа была рассмотрена общая картина обмена данными между нижним (сбор информации с контроллеров, установленных на подстанции по протоколу МЭК 61850) и верхним уровнем (передача информации в центры управления сетями (ЦУС), региональные диспетчерские управления (РДУ) по протоколу МЭК 60870-5-104) АСУ ТП. В рамках анализа были рассмотрены программно-технические комплексы, предназначенные для преобразования протоколов передачи данных.

Литература

1. **СТО 56947007-29.240.034-2009.** Руководящие указания по выбору объемов телеинформации при проектировании систем технологического управления электрическими сетями.

М.С. Мызин, студ.; Е.П. Окнин, асс.;
рук. М.С. Волков, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДГУ В СИСТЕМЕ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

При построении систем электроснабжения решается задача по обеспечению гарантированного электроснабжения электроприемников (ЭП) первой категории, в том числе «особой» группы ЭП (например, противопожарные устройства, оборудование операционных и реанимационных в медицинских учреждениях и т.п. [1]).

Потребители первой категории получают электроэнергию от двух независимых взаимно резервирующих источников питания (ИП), а для особой группы предусматривается дополнительно третий независимый источник, подключаемый при отключении двух основных [2]. В роли третьего независимого ИП, как правило, применяются генераторные установки, приводимые двигателями внутреннего сгорания (в основном дизель-генераторные установки (ДГУ), реже — газопоршневые установки — при наличии централизованного газоснабжения).

Предметом исследования являются переходные процессы при пуске и ступенчатом нагружении ДГУ. Для этого в программном комплексе *ETAP* была разработана модель, включающая ЭП особой категории надежности, подключаемый к системе общего электроснабжения, а также независимый ИП. Произведено моделирование процессов при отключении основного источника электроснабжения с последующим запуском ДГУ и переводом нагрузки на аварийный источник.

По результатам расчетов сделаны выводы о том, что при ступенчатом запуске потребителей и оптимальном распределении нагрузки по ступеням (по величине пускового тока ЭП от максимального к минимальному) снижаются провалы напряжения и частоты, уменьшается время выхода на номинальный режим. На основании анализа действующих нормативных документов и результатов проведенного исследования предложены рекомендации по упрощению проектных процедур выбора ДГУ и определения мощностей ступеней нагрузки.

Литература

1. СП 158.13330.2014. Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования, 2014.
2. Правила устройства электроустановок. Главы 1.1, 1.2, 1.7 – 1.9, 2.4, 2.5, 4.1, 4.2, 6.1 – 6.6, 7.1, 7.2, 7.5, 7.6, 7.10. 7 изд. М.: ЭНАС, 2008.

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В последнее время образовательные программы дисциплин электро-энергетического профиля ориентируются на использование электронных форм обучения.

В данной работе, направленной на разработку электронного учебно-методического комплекса, подготовлен лабораторный практикум для студентов первого курса магистратуры по направлению «Электроэнергетика и электротехника». В состав учебного курса, помимо лабораторных работ, входит курс лекций и ряд практических занятий.

Лекционный курс выполнен в виде презентаций и позволяет наглядно и доступно представлять информацию не только на очных занятиях, но также предполагает возможность использования в рамках дистанционных образовательных программ.

Практический курс состоит из комплекса расчетных заданий, а также контрольных мероприятий в виде интерактивных задач и тестовых заданий, позволяющих своевременно и эффективно оценивать успеваемость студентов.

В лабораторном курсе студентам предоставляется возможность освоить программные комплексы *EMTP-RV* и *ETAP*, интерфейс программ и основные функции, а также применить эти навыки для последующего моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов в системе собственных нужд электрических станций. Моделируются переходные процессы в электрических машинах собственных нужд электростанций для изучения особенностей режимов работы приводов насосов и вентиляторных нагрузок [1,2]. Также моделируются переходные процессы в системе оперативного постоянного тока и изучается их влияние на работу релейных защит.

Для этого были разработаны математические модели в программном комплексе *EMTP-RV* и методические указания по выполнению работ.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М: Энергия, 1970.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. М: Энергия, 1965.

И.А. Нестерчук, студ.; рук. И.П. Крючков, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ СЕТИ

В нормальных условиях несимметричные режимы в высоковольтных трехфазных сетях встречаются относительно редко. Обычно несимметричные режимы получаются в аварийных условиях, когда в какой-либо цепи появляется несимметрия. Различают два вида несимметрии – поперечную и продольную. Поперечная несимметрия возникает при подключении к симметричной трехфазной цепи несимметричной нагрузки. К такой нагрузке относятся различные виды замыканий (междуфазные, замыкание одной или двух фаз на землю). Продольная несимметрия возникает, когда в расщелку фаз линии включаются неодинаковые сопротивления или когда один или два провода обрываются (несимметричный участок линии).

Для расчетов несимметричных режимов трехфазных цепей удобно пользоваться принципом компенсации, заменяя несимметричный приемник или несимметричный участок в линии источниками ЭДС (напряжений). Целесообразность этого приема заключается в том, что после такой замены цепь становится симметричной и для нее равноименные симметричные составляющие токов и напряжений не зависят друг от друга. Связи же между симметричными составляющими токов и напряжений различных последовательностей, обусловленные несимметрией, вводятся позднее [1].

Для расчета несимметричных режимов сложных разветвленных цепей широко применяются моделирование схем и вычисления на ЭВМ.

В работе были проведены сравнения различных методик расчета тока и напряжения при различных вариантах повреждений сети.

Целью работы является анализ существующих методов расчета двойных несимметричных повреждений и разработка методики расчета двойных повреждений с использованием комплексных схем замещения

Следует продолжить анализ методик расчета тока и напряжения в сетях со сложными повреждениями.

Литература

1. **Лосев С.Б., Чернин А.Б.**, Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1983.

Б.О. Ньяваре, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АЭС И ГЭС ДЛЯ УСЛОВИЙ КЕНИИ

Наиболее освоенными и широко используемыми источниками энергии в Кении в настоящее время являются источники гидравлической энергии. В связи с растущей потребностью в электроэнергии вследствие быстрого роста индустриализации и экономики Кении, ядерная энергетика может стать самым лучшим решением проблемы. Поскольку уже существуют гидроэлектростанции в Кении, то строительство и эксплуатация комплекса АЭС и ГЭС будет способствовать более эффективному регулированию мощности в энергосистеме.

В современных условиях в объединенных энергосистемах покрытие графиков нагрузки обеспечивается совместной работой различных типов электростанций. Атомные электростанции эффективно работают с постоянной нагрузкой, что вызывает серьезные затруднения в энергосистемах при прохождении пиков графика нагрузки. ГЭС характеризуются высокой маневренностью оборудования, что способствует покрытию пиков графика нагрузки. Поэтому необходимость выравнивания графика нагрузки с учетом блоков АЭС может эффективно выполнять ГЭС [1].

Преимуществами такого комплекса являются: регулирование графика нагрузки энергосистемы, доступность использования воды для охлаждения на станциях, эффективное производство необходимого объема энергии и непрерывное электроснабжение при авариях.

В работе выполнена разработка электрической части проекта энергетического комплекса АЭС и ГЭС для условий Кении. В результате анализа перспективного графика нагрузки определена мощность и тип атомного реактора. На АЭС предполагается установить два реактора мощностью по 100 МВт с свинцово-висмутовым теплоносителем на быстрых нейтронах (СВБР-100) [2]. Определено место на реке для создания ГЭС мощностью 2×32 МВт. Выбраны структурные схемы ГЭС и АЭС и РУ. Выполнен расчет токов КЗ и выбрано необходимое электротехническое оборудование.

Литература

1. **Основы** современной энергетики / под общей редакцией Е.В. Аметистова. Издательский дом МЭИ, 2008.
2. **Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Господчиков И.В.** Эффективность использования парагазовой технологии в энергоблоке АЭС с ядерным реактором СВБР-100 // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 15—20.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

Перенапряжения на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС) — довольно частое явление. Согласно [1] основная доля повреждений микропроцессорной релейной защиты (рис. 1) приходится на грозовые перенапряжения, которые могут привести к ее ложному срабатыванию или выходу из строя. В связи с этим исследование и ограничение грозовых перенапряжений является актуальной задачей при строительстве и проектировании ЭС и ПС с целью координации изоляции электрооборудования.



Рис. 1. Статистика отказов при различных перенапряжениях

Цель работы — исследование наводимых в системе оперативного постоянного тока (СОПТ) выбросов напряжений, связанных с работой молниеприемников.

Авторами была разработана модель в программном комплексе *EMTP-RV*, позволяющая анализировать выбросы напряжения в СОПТ с учетом сопротивления заземляющих устройств [2].

Литература

1. **Matsumoto T, Kurosawa Y, Usui M, Yamashita K, Tanaka T.** Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment with High-Frequency Switching Surge in Japan.// IEEE Transactions on Power Delivery 2006. №. 1. P. 88—93.
2. **A. Ametani, Fellow, IEEE, and T. Kawamura, Fellow,** A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP.// IEEE Transactions ON power delivery. April 2005. Vol. 20. No 2. 867.

*А.В. Поляков, студ.; рук-ли А.М. Поляков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
А.А. Коновалов (ПАО «ФСК ЕЭС»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕГАЗОВЫХ

В настоящее время наиболее перспективным видом распределительных устройств являются комплектные распределительные устройства элегазовые (КРУЭ), так как это наиболее компактное решение, также КРУЭ не оказывают влияние на архитектурный облик территории. Открытые распределительные устройства (ОРУ) позволяют применять электрическое оборудование любых размеров, что существенно снижает их стоимость. Строительство ОРУ не требует дополнительных затрат на помещения, ОРУ удобнее КРУЭ при расширении и модернизации. Выбор типа распределительного устройства (РУ) следует осуществлять на стадии технико-экономического сравнения.

Был проведен анализ экономической эффективности ОРУ и КРУЭ. Для сравнения использовалась методика [1], основа которой состоит в расчете дисконтированных затрат за срок службы подстанции двух вариантов — ОРУ и КРУЭ. В качестве исходных данных использовался сборник с укрупненными стоимостными показателями линий электропередачи и подстанций напряжением 35—1150 кВ [2].

Для автоматизации расчетов автором разработано программное обеспечение, позволяющее производить технико-экономическое сравнение вариантов РУ.

Были проанализированы факторы, влияющие на увеличение стоимости РУ. Выявлено, что основными при текущих стоимостных показателях ячеек выключателей ОРУ и КРУЭ и соотношения занимаемой ими площади является кадастровая стоимость земли или специфические технические условия, например жесткие нормы по площади, в которые не вписывается ОРУ.

В подавляющем большинстве случаев предпочтительнее установка ОРУ. Для получения равноэкономичных вариантов требуется снизить стоимость КРУЭ не менее чем на 10 процентов.

Результаты исследований нашли практическое применение при обосновании выбора соответствующего вида РУ (ОРУ или КРУЭ).

Литература

1. **СТО 56947007-29.240.35.146-2013.** Правила проведения расчетов затрат на строительство подстанций с применением КРУЭ.
2. **СТО 56947007-29.240.124-2012.** Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35—1150 кВ.

А.В. Рахаев, студ.; рук. Л.Г. Мигунова, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИКИ РАЗГРУЗКИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ ПО МОЩНОСТИ

В настоящий момент в Единой энергетической системе России применяются различные виды автоматики предотвращения нарушения устойчивости. Одним из них является автоматика разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ). Принцип ее действия и алгоритм настройки описан в [1].

Предотвращение нарушения устойчивости при отключении элементов сечения обеспечивает автоматика разгрузки при отключении соответственно линии электропередачи, автотрансформатора, системы шин. Для несрабатывания АРПМ в этих случаях предусмотрено ее действие с выдержкой времени, достигающей в некоторых случаях 10 секунд. Это приводит к тому что АРПМ способна обеспечить только сохранение статической устойчивости в послеаварийном режиме. Предотвратить нарушение динамической устойчивости с такой выдержкой времени невозможно. К тому же АРПМ контролирует переток активной мощности только по одному элементу сечения. В случае его аварийного отключения или планового вывода в ремонт АРПМ функционировать не будет.

Решить эти проблемы можно, если АРПМ будет контролировать суммарный переток активной мощности в сечении. В случае аварийного или планового отключения элемента сечения суммарный переток активной мощности по сечению не изменится, АРПМ не подействует и продолжит функционировать. Выдержку по времени можно уменьшить до 0,5-1 секунд для предотвращения излишних срабатываний при синхронных качаниях [1], что даст возможность применения АРПМ для сохранения динамической устойчивости при отключениях мощных генераторов в части энергосистемы, принимающий мощность по сечению.

Переток активной мощности по сечению предлагается определять суммированием телеизмерений активной мощности в оперативно-информационном комплексе диспетчерского центра. После этого полученное значение должно быть передано по каналам связи в комплекс АРПМ, установленный на электростанции или подстанции. АРПМ должна сравнивать суммарный переток активной мощности по сечению с уставкой по мощности, определенной в соответствии с [1] и при превышении первого действовать на необходимый объем управляющих воздействий.

Литература

1. Беркович М.А. и др. Основы автоматики энергосистем. М.: Энергоиздат, 1981.

В.С. Рябченко, студ.; рук. М.А. Козина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ВЕТРОВУЮ СТОЙКОСТЬ

При эксплуатации жесткой ошиновки в открытых распределительных устройствах (ОРУ) подстанций напряжением 110 кВ и выше возможно возникновение ветровых резонансных колебаний шин, обусловленных срывом вихрей с частотой, равной или близкой к частоте собственных колебаний шин [1]. Амплитуда резонансных колебаний прямо пропорциональна квадрату диаметра шины и обратно пропорциональна ее массе и логарифмическому декременту затухания. Для подавления устойчивых резонансных колебаний наиболее эффективным является увеличение рассеяния энергии и, следовательно, логарифмического декремента затухания. Для этого могут применяться демпфирующие устройства.

Данная тема является актуальной, так как при проектировании ОРУ с жесткой ошиновкой необходимо учитывать ветровой резонанс и ветровые колебания, которые приводят к ослаблению соединений и усталостным повреждениям конструкции.

Целью работы является расчет жесткой ошиновки на ветровую стойкость и оценка влияния ветровой нагрузки с применением демпферов различной длины и диаметра для уменьшения ее колебания.

На основе исследований и расчетов были проанализированы и рассчитаны возможные ветровые нагрузки, ветровая стойкость шинных конструкций при использовании демпфирующих устройств различных типов.

В результате был рассчитан наибольший прогиб шинной конструкции, который был сопоставлен с максимальным расчетным прогибом шины. Были рассчитаны наибольшие напряжения в материале шин.

Результаты исследований могут быть использованы при выборе электротехнического оборудования при проектировании ОРУ с жесткой ошиновкой.

Литература

1. **СТО 56947007-29.060.10.006-2008.** Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110—500 кВ.

Ю.Р. Салимова, студ.; рук. М.С. Волков, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

В связи с увеличением роста нагрузки и укрупнением электрических сетей все более остро встает вопрос надежности электроэнергетических систем. Под надежностью понимают комплексное свойство объекта. Применительно для ЭЭС – это бесперебойное снабжение электрической энергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [1].

В России вопросу надежности в период реформ 1991–2000 гг. уделялось недостаточное внимание: актуализация нормативной базы затянулась, сбор информации, анализ и прогноз надежности ЭЭС сегодня уступают дореформенному уровню. За рубежом оценка надежности электроэнергетических систем является одной из приоритетных задач. С целью оценки надежности электроустановок было разработано довольно много программных комплексов (*Neplan*, *PowerFactory*, *ETAP* и др.), позволяющих производить требуемые расчеты.

Целью работы является сравнительный анализ методов оценки надежности в России и за рубежом и формирование на его основании предложений по адаптации подходов по оценке надежности к условиям, применимым в России.

К 2003 году более 10 стран на территории Европы и некоторые электросетевые компании в США систематически занимались определением показателей бесперебойности электроснабжения потребителей. Были разработаны стандарты *IEEE 1366-2003* и *EN 50160*, которые определяют ряд показателей бесперебойности поставки электроэнергии [2]. В России с 1 июля 2014 года введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», также очень близкий по структуре и содержанию к *EN 50160:2010*.

Литература

1. **Непомящий В.А.** Надежность оборудования энергосистем. М.: Изд-во «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013.
2. **IEEE 1366-2003.** Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices.

*М.В. Сапунов, А.А. Ермошина, студенты;
рук. Е.А. Кротков, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА МНОГОАГРЕГАТНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Республика Саха (Якутия) отличается неразвитостью электрической системы, заключающейся в наличии изолированных энергоузлов. В качестве электростанций в таких системах используются группы параллельно работающих дизельных электрогенераторов (ДЭГ) [1]. Общее количество дизельных электростанций в регионах Дальнего Востока РФ — 203 единицы с потреблением топлива на сумму 4,3 млрд рублей в год. Актуальной задачей является снижение расхода топлива на дизельных электростанциях (ДЭС) ввиду отсутствия готовых к внедрению альтернативных источников электроэнергии [2].

Потребителями ДЭС являются рабочие поселки и небольшие промышленные предприятия со средневзвешенным коэффициентом мощности в пределах 0,7—0,75. Компенсация реактивной мощности требует увеличения токов возбуждения генераторов, что приводит к увеличению расхода топлива и числа работающих ДЭГ.

В качестве технического решения, снижающего выработку реактивной мощности синхронными генераторами, предложено применение источников реактивной мощности (ИРМ).

Рассмотрено два режима компенсации: включение ИРМ в наиболее загруженные периоды суточного графика электрических нагрузок и включение ИРМ постоянно.

Были проведены расчеты суточного расхода топлива для зимнего максимума Чокурдахской ДЭС, расположенной в пос. Чокурдах Аллаиховского улуса Республики Саха для трех режимов: без компенсации реактивной мощности, с компенсацией в 240 кВАр во время пиковых нагрузок и с постоянной компенсацией в 150 кВАр.

Анализ расчетов показал, что экономия топлива в сутки при работе ДЭС с ИРМ, включаемым в часы максимальных нагрузок, составила 309,3 л (16,9 %), с постоянно включенным ИРМ — 456,6 л (24,9 %).

Литература

1. **Ефремов Э.И.** Экономика топливно-энергетического комплекса Якутии. Новосибирск: Наука, 2007.
2. **Стратегия** развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утверждена президентом РФ 8 февраля 2013 г. № Пр-232.

В.С. Сурков, Б.К. Кошматов, студенты;
рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНФИГУРИРОВАНИЯ SCADA СИСТЕМЫ ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДСТАНЦИИ

Согласно современным требованиям при разработке программно-технических комплексов автоматизированных систем управления технологическим процессом (ПТК АСУ ТП) подстанций вся конфигурационная информация должна быть структурирована и храниться в базе данных, при структурировании рекомендуется руководствоваться нормами стандарта МЭК 61850-6,7 [1]. Согласно нормам стандарта [2] при разработке ПТК должен быть сформирован файл описания конфигурации подстанции *SCD (Substation Configuration Description)* в формате языка описания конфигурации подстанции *SCL (Substation Configuration description Language)* который, согласно [1], должен содержать:

- однолинейную схему подстанции;
- список всех устройств с моделью данных и адресацией;
- привязки логических узлов устройств к первичной схеме подстанции.

При смене *SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)* системы на подстанции нет необходимости разработки ее с нуля, если имеются инструментальные программные средства, поддерживающие загрузку *SCD*-файла для упрощения интегрирования *SCADA* в ПТК подстанции.

В данной работе рассмотрено интегрирование *SCADA* системы «ТЕ-КОН» на полигоне кафедры «Электрические станции» Национального исследовательского университета «МЭИ», изучено конфигурирование информационной модели устройств и информационного обмена между устройствами в программном обеспечении верхнего уровня АСУ ТП подстанции. На основе проведенных работ выполнен анализ поддержки *SCL* рассматриваемой *SCADA* системой.

Материалы проведенных исследований могут быть использованы при разработке методических материалов для обучения.

Литература

1. **СТО 56947007-25.040.40.227-2016.** Типовые технические требования к функциональной структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций Единой национальной электрической сети (АСУ ТП ПС ЕНЭС), 2016.

2. **IEC 61850.** Communication networks and systems in substations. Technical committee 57. International Electrotechnical Commission, 2003.

В.А. Устиненков, В.Ю. Русаков, студенты;
рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ НА ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЕ

Одним из путей развития электроэнергетических систем является создание так называемой интеллектуальной системы [1].

Для решения задач развития энергосистемы России потребуются совершенствование технологий производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии, в частности, применение силовых устройств гибких систем переменного тока нового поколения — устройств FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) [2].

Актуальной является проблема исследования влияния устройств FACTS на уровни токов короткого замыкания (ТКЗ) в энергосистеме. Также актуально исследование возможности снижения ТКЗ от комплексов, состоящих из электрических машин и преобразователей частоты, а также ограничения ТКЗ с помощью других устройств FACTS. Существуют различные способы ограничения ТКЗ, однако возможности снижения ТКЗ с помощью устройств FACTS и их влияние на уровень ТКЗ практически не исследованы.

К устройствам FACTS относятся различные устройства регулирования реактивной мощности, регулирования параметров сети, ограничения ТКЗ и преобразователи рода тока.

В работе проведена расчетная оценка влияния на уровень ТКЗ статического тиристорного компенсатора, статического компенсатора (СТАТКОМ), управляемого шунтирующего реактора, а также определены способы ограничения ТКЗ с помощью некоторых устройств FACTS.

Для анализа поведения устройств FACTS при КЗ были разработаны модели систем в программных комплексах *EMTP-RV* и *MatLabSimulink* с учетом параметров и особенностей применения каждого отдельного устройства.

Результаты проведенных исследований могут быть рекомендованы для использования при разработке технических предложений по снижению ТКЗ с помощью устройств FACTS.

Литература

1. Зеленохат Н.И. Интеллектуализация ЕЭС России: инновационные предложения: практическое пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока / В.В. Дорофеев, Ю.Г. Шакарян, В.И. Кочкин и др. // Электрические станции. 2004. № 8. С. 10—13.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТРОЙСТВ БАВР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В распределительных сетях 6—35 кВ все более актуальной становится проблема кратковременного нарушения электропитания потребителей особой группы I категории. Причина этому – изношенность оборудования и ошибочные действия персонала.

Одним из способов повышения надежности электроснабжения потребителей является использование средств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР). Полное время срабатывания таких устройств в настоящее время не превышает 65 мс [1]. Широкое применение данное устройство нашло в сетях с неявным резервом, в котором ввод второго независимого источника питания осуществляется путем включения секционного выключателя.

Также для обеспечения бесперебойной работы вспомогательных систем электроприемников возможно применение устройств гарантированного питания (УГП), в состав блоков которых могут входить аккумуляторная батарея, инвертор, БАВР и аварийный дизель-генератор.

В данной работе проведен анализ условий применения источников питания в шкафах УГП: выбор емкости аккумуляторной батареи, согласование потребителей особой группы I категории с инвертором, алгоритм срабатывания и блокировка действия БАВР при КЗ.

В качестве примера была рассмотрена схема электроснабжения нефтеперекачивающей станции (НПС) от двух независимых источников 10 кВ и нагрузкой в качестве синхронных двигателей магистральных насосных агрегатов (МНА) на каждой из секций 10 кВ. Потребителями особой группы первой категории являются контрольные устройства и автоматика, обеспечивающие безопасность режима работы участка нефтепровода.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по повышению надежности электроснабжения ответственных потребителей промышленных предприятий.

Литература

1. **Быстродействующее** устройство АВР с одноканальным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / С.И. Гамазин, В.А. Жуков, С.А. Цырук, В.М. Пупин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. № 9.

А.В. Черных, студ.; рук. Ю.В. Монаков, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ СОПТ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Система оперативного постоянного тока (СОПТ) подстанции является наиболее ответственным элементом всей электроустановки, так как именно она обеспечивает работу релейных защит и автоматики, в том числе в аварийных режимах. Источником аварийного питания СОПТ является аккумуляторная батарея, параметры которой определяются составом нагрузки СОПТ.

Зачастую некорректный выбор аккумуляторной батареи может привести к несрабатыванию приводов высоковольтных выключателей или к отказу релейных защит и автоматики. Согласно методическим указаниям по выбору оборудования СОПТ, разработанным на кафедре «Электрические станции» МЭИ, выбор аккумуляторной батареи сопряжен с трудоемким расчетом, предполагающим несколько итераций и сложных проверок. Для ускорения процесса выбора при проектировании СОПТ подстанций и исключения ошибок, вызванных человеческим фактором, было разработано приложение для выбора аккумуляторной батареи в соответствии с СТО 56947007 29.120.40.216-2016.

Реализация автоматизированного выбора осуществляется в интегрированной среде разработки *Visual C#*. Для выполнения расчета в окне программы (рис. 1) необходимо ввести исходные данные, такие как значения токов и продолжительности постоянной, временной и кратковременной нагрузок, номинальное напряжение.

Рис. 1. Форма разработанного приложения для ввода исходных данных

В ходе расчета анализируется целесообразность установки дополнительной группы аккумуляторов и балластного устройства для стабилизации напряжения. В результате расчета пользователю выводится информация о количестве, емкости и типе выбранных аккумуляторов в отдельном диалоговом окне.

Секция 53

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Председатель секции — к.т.н., доцент Т.А. Шестопалова

Секретарь секции — зав. учебной лабораторией

Д.Н. Кунакин

*Arzika Souley Abdoul Rachid, Elhadji Abdou Jigo Mahaman Salissou,
Moussa Dandakoye Yacouba, Degree Students;
supervisor ELHADJI AMADOU Hamissou, Lecturer Department of Physics
(University Dan Dicko Dan Koulodo of Maradi, Republic of Niger)*

DESIGN SOLAR HEATER CARRY OUT IN REPUBLIC OF NIGER

The solar water-heater is one of the applications the most important of solar energy, because it touches several big consumer sectors of the hot water, such as habitat, hotel business, hospitals, barracks, etc. who can meet needs up to 80 %, he contributes to the reduction of gases with greenhouse effect and with the economy of energy [1]. It is in this context that we used renewable energy sources due to their availability in our country to set up a solar water-heater meeting needs in health hot water of a family of 7 persons.

This plan aims at contributing, of a way of theoretical and practical, to the available use of local materials to make realization and popularization of this solar water-heater.

A detailed study of needs and of factors of influence (season, day of the week, living standard, etc.) of these allowed making it a definite valuation. We could so determine the necessary surface of the insulator and the volume of the reservoir (tank). And therefore, after a judicious choice of materials, we performed the building and the drawing of the different components of this installation [2]. At the end we have supplement this job with an environmental impact assessment environmental.

References

1. **Recommandation** Professionnelle Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, chauffe-eau solaire en habitat individuel, conception et dimensionnement. P. 17—20.
2. **Projet de fin d'étude**, Conception et réalisation d'un chauffe-eau solaire UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, Сийнгал (2007). P. 3—21.

Н.В. Алиходжина, студ.; рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ MICROGRID С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются перспективными с точки зрения создания локальных энергетических систем для энергообеспечения удаленных потребителей. Основной особенностью использования энергоустановок на основе ВИЭ является непостоянство генерации энергии во времени, что влечет за собой потребность в регулировании, запасании и перераспределении вырабатываемой энергии.

Решение указанной проблемы, как правило, достигается с помощью применения аккумуляторов энергии различного типа и параллельной работы энергоустановок на основе ВИЭ с генераторами гарантированного энергообеспечения. Сочетание этих подходов образует самобалансирующуюся локальную энергосистему или «microgrid», которая базируется на широком использовании средств распределенной генерации, систем накопления энергии, технологий и средств управления распределенными потребителями энергии.

На сегодня наиболее эффективными аккумуляторами являются маховики, электрохимические маховики, пневматические аккумуляторы и ГАЭС. У последней неоспоримое преимущество в объемах запасаания энергии и сроке службы, однако, у нее высокая стоимость.

Кафедра «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» располагает лабораторным комплексом, позволяющим создавать любые конфигурации локальных энергосистем, исследовать режимы их работы. Для моделирования энергетического комплекса используются электромеханическая модель ГАЭС, имитатор солнечной электростанции и управляемая нагрузка, которая моделирует автономного потребителя. В результате исследования определены преимущества и недостатки ГАЭС по сравнению с ДЭС, сформулированы области применения ГАЭС в сетях microgrid.

А.С. Борщ, асп. (АО «Институт Гидропроект»);
рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ПРОПУСКА МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ С УЧЕТОМ НЕГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ ЗЕРКАЛА ВОДОХРАНИЛИЩА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА

Задача проведенных в работе исследований сводится к оценке пропуска максимальных расходов воды обеспеченностью $P = 0,01$ % через сооружения девяти крупных гидроузлов Волжско-Камского каскада с использованием заданных динамических характеристик объемов водохранилищ. Традиционно при расчетах пропуска максимальных расходов принимается допущение, что зеркало водохранилища является плоским и горизонтальным. В действительности отметка воды в верхнем бьефе несколько увеличивается по мере отдаления от плотины в сторону вышерасположенного створа, и увеличение зависит от интенсивности притока и влечет отличие объемных характеристик водохранилища от статических характеристик, зависящих от уровня верхнего бьефа и не зависящих от Q -притока.

Необходимые для проведения расчета данные взяты из различных источников, а также предоставлены АО «Институт Гидропроект» (в их числе — динамические характеристики объемов водохранилищ Волжско-Камского каскада). Расчет выполнен с использованием уравнений водного баланса итерационным путем при помощи программы «Каскад».

Результатом проделанной работы являются полученные значения расхода через сооружения каскада $Q_{НБ}$ и отметки уровня верхнего бьефа в многоводный период в случаях использования статических и динамических кривых объемов водохранилищ. Расчеты при учете негоризонтальности зеркала показывают, что при пропуске максимальных расходов через сооружения Волжско-Камского каскада значения $Q_{НБ\max}$ ниже, чем соответствующие значения, полученные с использованием статических кривых объема, на большинстве гидроузлов. Вероятнее всего, это связано с тем, что при допущении негоризонтальности зеркала водохранилища появляется дополнительный объем воды для трансформации, что позволяет уменьшить расход воды в нижний бьеф. Эту гипотезу подтверждает значительная разница максимальных уровней верхнего бьефа на Саратовской ГЭС, полученных при расчете с ограничением $Q_{НБ}$ по пропускной способности гидроузла: $Z_{ВБ\max}^{\text{дин}} = 33,07$ м меньше $Z_{ВБ\max}^{\text{стат}} = 34,15$ м за счет появления дополнительного объема воды в водохранилище.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

В последнее время все больше внимания в мире уделяется развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Необходимость соблюдения новых требований по защите окружающей среды и стремление к повышению доступности энергоресурсов заставляет правительства стран принимать законы по поддержке развития ВИЭ. В РФ по распоряжению президента в 2009 году была составлена программа по повышению эффективности электроэнергетики на основе использования ВИЭ.

Солнечная энергетика представляет собой одно из самых перспективных направлений возобновляемой энергетики. Такие регионы Российской Федерации, как Алтай, Бурятия, Краснодарский край, Северный Кавказ, являются наиболее перспективными в плане использования солнечной энергетики. Однако при проектировании и эксплуатации солнечных электростанций (СЭС) возникла проблема прогнозирования эффективности использования такой станции в данном географическом районе. Эффективность использования одним солнечным модулем выражается формулой

$$P = E_{\text{инс}} F \eta,$$

где $E_{\text{инс}}$ — инсоляция, приходящая на площадь F солнечного модуля с КПД η . В процессе эксплуатации станции специалист по оптовому рынку электроэнергии и мощности должен своевременно предоставлять план по выработке электроэнергии на СЭС на рынок «на сутки вперед». Точность его прогноза напрямую влияет на экономику компании, отвечающей за эксплуатацию данной СЭС.

В случае проектирования и эксплуатации солнечной электростанции решающую роль играет инсоляция, которая зависит от ряда погодных условий. Для успешного составления прогноза необходимо учитывать высоту облаков и общую облачность, также большое значение имеет наличие осадков, дымки, тумана и т.д.

Исследование заключается в создании математической модели, описывающей влияние различных природных явления на инсоляцию, а следовательно, и на выработку электрической энергии на СЭС.

Е.А. Вольмер, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

В работе проведен подробный анализ топливно-энергетического комплекса на территории Алтайского края, показана целесообразность строительства крупных ветроэлектрических станций (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС) в данном регионе, что также подтверждается принятыми программами развития энергетики в регионе Алтайский край.

Для оценки перспективности строительства крупных ВЭС в данном регионе был проведен подробный расчет и анализ ветровых ресурсов [1] на всей территории Алтайского края по данным 25 наземных метеостанций с сайта «Погода России». Для оценки эффективности строительства СЭС по данным из трех баз данных: СБД NASA, БД НПС и БД Meteororm производится расчет и анализ ресурсов солнца [2]. Выявлено, что на территории Алтайского края эффективно использовать оба вида источников энергии. Окончательно площадка для размещения ВЭС и СЭС выбрана вблизи г. Славгород. Для выбора оборудования ВЭС было проведено моделирование ресурсов ветра по данным метеостанции-аналога МС Славгород, выбор которой также был обоснован. Построение вертикального профиля ветра проводилось по разработанным на кафедре ГВИЭ эмпирическим зависимостям для Сибирского ФО.

Выбор модели ВЭУ производился из 10 предварительно отобранных вариантов ВЭУ (в соответствии с ГОСТ Р 54435—2011) с различными высотами башен. Для каждой высоты башни была проведена оценка энергоэффективной модели ВЭУ. Был определен оптимальный угол наклона приемной площадки и осуществлен выбор наиболее энергоэффективной модели фотоэлектрических модулей из 10 предварительно отобранных вариантов.

Для принятия окончательного решения о целесообразности использования того или иного источника энергии сравнивается выработка СЭС и ВЭС и занимаемая ими площадь.

Литература

1. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачёв, Т.А. Шестопалова. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Солнечная** энергетика / В.И. Виссариев, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

*Д.М. Ильин, асп.; рук-ли А.Г. Васьков, к.т.н, доц.;
Т.А. Шестопалова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Существует несколько компьютерных программных сред для моделирования процессов в электрических системах, имеющие одинаковые возможности, но разную точность. Целью работы является исследование моделирования определенных величин при известных начальных условиях и заданных математических зависимостях параметров. Моделирование электрических процессов обычно производится с привязкой по времени. Программы для моделирования служат разным целям, одни для процессов в энергосистемах, другие рассматривают подробно процессы в электрических машинах. Ниже приведены основные программы для моделирования электрических процессов:

PSCAD/EMTDC – электромагнитные переходные процессы для электрических систем и систем управления;

PSS/E – моделирование электрических систем передачи энергии;

DIgSILENT PowerFactory – инструмент для анализа энергосистем, в т.ч. для применений производства, передачи и распределения энергии;

SIMPOW – моделирование энергосистем, с акцентом на динамические временные процессы и анализа частотных диапазонов.

Matlab Simulink – среда для моделирования процессов динамических и встроенных систем в широком диапазоне, содержащая дополнительный набор инструментов SimPowerSystems для моделирования систем производства, передачи и распределения электроэнергии.

Возможности различных сред сравниваются в [1] для модели ВЭУ с фиксированной скоростью вращения при аварии в сети (симметричный и несимметричный режим). Хотя некоторые среды сравниваются с разными задачами, особенно PSS/E и PSCAD/EMTDC. Источник [1] показывает, что различные среды дают точные результаты в соответствии с поставленными задачами. Ни в одной из используемых в [1] программ не была использована стандартная модель ВЭУ, представленная в библиотеке программы. Вместо этого была реализована модель, путем использования стандартных компонентов.

Литература

1. **Lund Torsten; Eek Jarle.** Dynamic fault simulations of wind turbines using commercial simulation tools. KTH: University of Strathclyde, 2005.

И.С. Ищенко, асп.; рук. Т.А. Шестопалова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАБОТА ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ВИЭ В СОСТАВЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Электроснабжение значительной части поселений, расположенных в удаленных районах Крайнего Севера, Дальнего Востока и Восточной Сибири, осуществляется изолированно от ЕЭС. Источниками электроэнергии в этих регионах в основном являются автономные газопоршневые, газотурбинные и дизельные электростанции, а связи представлены линиями 35 кВ и ниже.

Существующее состояние данных энергосистем накладывает объективные ограничения на уровень развития экономики и качество жизни населения этих территорий. К тому же выработка электроэнергии производится в основном на ДЭС, работающих на дорогостоящем привозном топливе. Это и определяет направление развития регионов, связанное с повышением энергоэффективности генерирующих установок и поиске новых источников электроэнергии, которыми могут стать возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Появление объектов распределенной генерации на базе ВИЭ в составе изолированных энергосистем оказывает существенное влияние на режим их работы. Основной причиной этого является колебание выработки электроэнергии во времени. Так, с увеличением доли ВИЭ растет нагрузка на традиционные генерирующие мощности для балансирования системы, а следовательно, возрастает потребность во вращающемся резерве. При этом внезапное изменение выработки генераторами на основе ВИЭ может происходить настолько быстро, что не остается времени для запуска других генерирующих установок. Все это влияет на устойчивость работы изолированных энергосистем, что диктует необходимость введения новых требований к принципам построения и управления системами [1].

Таким образом, при обосновании строительства объектов ВИЭ в изолированных системах необходимо проводить качественный анализ функционирования сетей с учетом ограничения пропускной способности существующих линий электропередач, маневренности электростанций и технологических ограничений на работу ДЭС, а также проводить мероприятия (установка потребителей-регуляторов, накопителей энергии), направленные на обеспечение устойчивой работы систем, надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии.

Литература

1. **Развитие** систем распределенной энергетики с электростанциями на основе возобновляемых источников энергии / Т.А. Шестопалова, С.А. Абдулкеримов, А.Г. Васьков, М.Г. Тягунов // Материалы Девятой Международной теплофизической школы. 2014. С. 705—707.

Н.Д. Карпов, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЭС НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЯЕМОЙ ВЭС

Целью работы является исследование влияния учета удельной расходной характеристики дизельной электростанции (ДЭС) на энергетические и экономические показатели внедряемой ветроэлектрической станции (ВЭС) на примере локальной энергосистемы (ЛЭС) о. Попова.

Для проведения технико-экономического обоснования внедряемой ВЭС были рассмотрены 7 наиболее энергоэффективных вариантов моделей ветроэлектрических установок (ВЭУ), выбор которых производился из предварительно отобранных 60 моделей ВЭУ по критерию энергоэффективности — максимальному значению коэффициента использования установленной мощности. Окончательный вариант ВЭС (модель 100С-21 фирмы NPS, 9 установок) производился на основе баланса мощности и энергии по критерию максимальной экономии расхода топлива на ДЭС, что составляет 31,7 % от общего годового потребления топлива ДЭС при неизменном удельном расходе топлива $b_{уд}$, равного 223 г/(кВт·ч). Анализ режима работы ДЭС выявил, что большую часть года ДЭС (около 50 %) работает с мощностью менее $0,5N_{ном}$ [1].

Анализ фактического режима ДЭС по выработке электроэнергии и расходу топлива за каждые 8 часов в течение года (рис. 1) позволил выявить аппроксимирующую зависимость удельного расхода топлива от рабочей мощности ДЭС $b_{уд}(N_{ДЭС}) = 864,82(N_{ДЭС})^{-0.208}$, неучет характеристики $b_{уд}(N_{ДЭС})$ приводит к занижению планируемого расхода топлива на ДЭС на 13 % и соответственно к занижению себестоимости электроэнергии от ветродизельного комплекса (ВДЭК) в целом; учет характеристики приводит к повышению энергоэффективных показателей внедряемой ВЭС на 1 %, который зависит от распределения нагрузок между ВЭС и ДЭС.

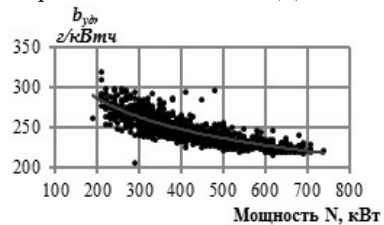


Рис. 1. Табулированная и аппроксимирующая зависимости $b_{уд}(N_{ДЭС})$

Литература

1. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачёв, Т.А. Шестопалова. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ ИНДЕКСНЫМ И АБСОЛЮТНЫМ МЕТОДАМИ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Основной целью натурных энергетических испытаний гидроагрегатов является уточнение энергетических характеристик. Испытания могут выполняться абсолютным и индексным методами. Абсолютный метод предусматривает определение фактических значений КПД и расхода. При индексном методе определяется относительное значение КПД [1, 2].

По результатам проведенных испытаний построены следующие характеристики (рис. 1):

$$\varphi = f(a_0), \text{ при } H = \text{const}; \quad N_m = f(a_0), \text{ при } \varphi = \text{const};$$

$$\sqrt{h}, Q = f(a_0), \text{ при } \varphi = \text{const}; \quad \eta_m^* = f(N_m) \text{ при } \varphi = \text{const}.$$

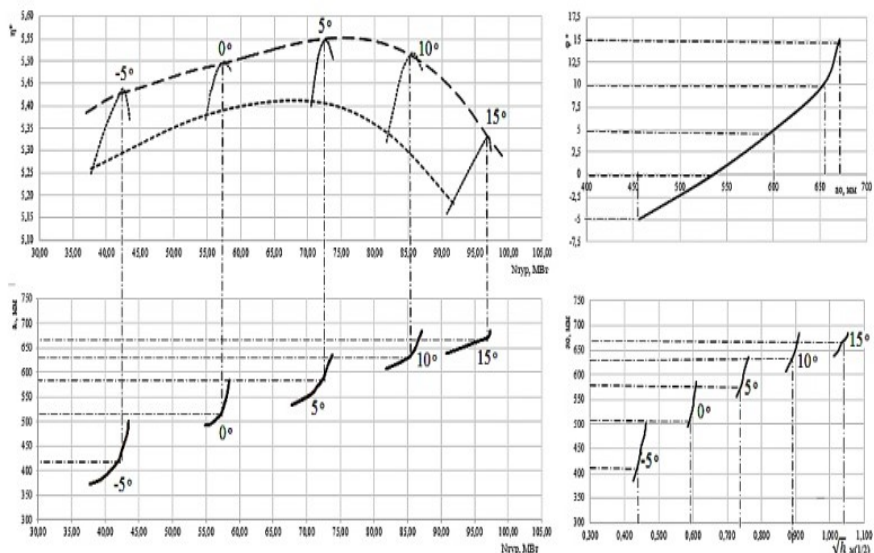


Рис. 1. Результаты энергетических испытаний

Точное определение действительных значений параметров работы гидроагрегата является весьма актуальным не только для уточнения энергетических характеристик, но и для повышения технико-экономических показателей станции.

Литература

1. **ГОСТ 28842-90.** Турбины гидравлические. Методы натуральных приемочных испытаний. 2005. IV. 105 с.: ил.
2. **СТО 17330282.27.140.005-2008.** Гидротурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования, 2008. IV. 82 с.

ОБОСНОВАНИЕ НАЗНАЧЕНИЯ ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОПАВОДКОВОГО

Речные наводнения — неизбежное природное явление. Так, например, в июле 2013 года несколько регионов Дальнего Востока спасались от самого сильного наводнения за 120 лет.

Работе рассматривается целесообразность применения Зейского водохранилища многолетнего регулирования как противопаводкового. Для обоснования данной функции были исследованы левые притоки реки Амур и выбраны возможные створы. Для створов были определены НПУ и рассчитаны объемы водохранилищ. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество рек, шт.	Количество створов, шт.	Объем водохранилищ, V [м ³]	Длина гребней плотин, при НПУ, [км]	Средняя высота плотин, [м]
5	28	9	46	37,5

Далее, следуя рекомендациям ПИВР, были произведены водно-энергетические расчеты сработки и наполнения Зейского водохранилища. Для этого было определено НПУ₁ по формуле (1), при котором велись расчеты. То есть отметка, соответствующая снижению объема Зейского водохранилища на величину, равную суммарным объемам водохранилищ, рассмотренных ранее:

$$V_{\text{НПУ}_1} = V_{\text{ХХ}} - 8 = 74,6 - 8 = 66,6 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где $V_{\text{ХХ}}$ — объем, соответствующий отметке ВВ, при которой начинаются холодные сбросы.

По кривой связи $Z_{\text{ВВ}}(V)$ находим отметку: НПУ₁=314,18 м.

Расчеты проводились при условии превышения заданного НПУ. Затем была посчитана общая выработка электроэнергии и приведены сравнения ее с фактической выработкой. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Э _{РАСЧ} , млн кВт·ч	Э _{ФАКТ} , млн кВт·ч	Разница, млн кВт·ч
60673	54297	6376

Подводя итоги, можно сказать о том, что в результате наводнения Амурской области в 2013 пострадало 135 тыс. человек, ущерб составил 40 млрд руб. В будущем такие масштабы можно сократить, если Зейское водохранилище будет нести роль противопаводкового.

Литература

1. **Наводнение** в Амурской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sdelanounas.ru/blogs/39879/>

О.И. Кольцун, М.А. Спиридонова, студенты;
рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ, ПРЕОБРАЗУЮЩИЙ ХИМИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ПОЧВЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Гальванический элемент — химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов и/или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока [1].

Принцип работы гальванического элемента на основе электро-химической энергии почвы довольно простой. Любое отклонение кислотности среды от $\text{pH}=7$ запускает процесс переноса свободных электронов и протонов [2]. Благодаря повышенной кислотности почвы можно буквально воткнуть в грунт два электрода (цинковый и медный) и получить электричество (см. рис. 1).



Рис. 1. Схема установки на основе электрохимической энергии почвы

Для построения источника, который способен получать электричество из грунта потребуются следующие составляющие: 1) электроды (толстый медный провод; цинковая пластинка); 2) соединительные провода; 3) емкость с почвой (например, цветочный горшок); 4) вода.

Разработанная электроустановка представляет собой 24 емкости размером 5×5 см, заполненные землей. Из них составлена электрическая цепь из 6 параллельно соединенных цепочек, каждая из которых включает по 4 гальванических элемента: $U_{\text{вых}} \text{xx} = 3 \text{ В}$;
 $I_{\text{вых}} \text{кз}} = 19 \text{ мА}$.

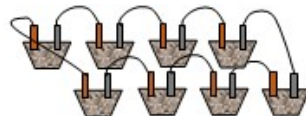


Рис. 2. Принципиальная схема соединения гальванических элементов

Мощность данного гальванического элемента зависит от нескольких факторов: влажность и солесодержание почвы; размеры электродов и расстояние между ними [3].

Литература

1. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia>. (Дата обращения: 13.09.2016 г.).
2. [Электронный ресурс]. URL: <http://cotlix.com/kak-poluchit-elektrichestvo-iz-zemli> (Дата обращения: 20.05.2016 г.).
3. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnauka.com/1_NIO_2011/Tecnic/77215.doc.htm (Дата обращения: 13.09.2016 г.).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Сейчас известно несколько различных интеллектуальных энергосистем, таких как smart-grid, micro-grid, energynet. По большому счету друг от друга они отличаются только названием, но принципиально отличаются от традиционных систем. Micro-grid — система, которая базируется на широком использовании средств распределенной генерации, систем накопления энергии, технологий и средств управления распределенными потребителями энергии.

Традиционные системы автоматизированы, они управляются по определенным ранее заданным алгоритмам. Интеллектуальные системы отличаются от традиционных, изначально в них также загружен алгоритм действий в тех или иных ситуациях, но интеллектуальные системы способны изменять алгоритмы работы при тех или иных обстоятельствах.

В настоящее время активно внедряются технологии распределенной генерации электроэнергии, включающие устройства аккумулирования энергии, как на стороне генератора, так и у потребителя, генерацию на основе возобновляемых источников энергии, системы управления потреблением энергии. У таких технологий есть много положительных сторон, но есть и отрицательные.

Плюсы заключаются в более точной и оперативной реакции системы на изменившиеся условия, среди которых могут быть снижение нагрузки потребителей, отказ источников энергии или аварии. К минусам таких систем относится необходимость «обучать» систему на специальных стендах, моделирующих энергосистему.

Стенд, моделирующий энергосистему, установлен в НИУ «МЭИ» на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии (ГВИЭ). Он состоит из нескольких частей, соединенных в энергосистему:

- Стенд единой энергосистемы и сборных шин, управляющий подключением источников и потребителей в систему с помощью SCADA-систем;
- Стенд электромеханической модели гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС);
- Стенд электромеханической модели ВЭУ с асинхронизированным синхронным генератором;
- Стенд с имитаторами солнечных модулей;
- Стенд управляемой нагрузки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ВОЗДУШНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для обеспечения потребностей человека неуклонно растет. Зарубежные страны и крупные несырьевые компании поддерживают и развивают это направление энергетики. Однако ресурсы возобновляемых источников энергии не располагают гарантированной мощностью, поэтому в комплексах, использующих эту энергию, необходимо устанавливать дополнительные источники питания, такие как дизельные установки, либо использовать аккумуляторы энергии. Для перераспределения энергии ВИЭ во времени можно использовать воздушные аккумуляторы, которые уже успешно применяются в комплексах с газотурбинными установками. Они могут быть подземными, состоящими из резервуаров, куда подается воздух под давлением. Такие электрические станции используются для аккумуляции и последующей выработки энергии для покрытия пиковых нагрузок.

Принцип действия таких комплексов заключается в следующем. В часы глубоких провалов потребления энергии в системе воздух в аккумуляторы установки закачивается компрессорами с электроприводом, а в период пика энергопотребления воздух из воздушных аккумуляторов поступает в камеру сгорания газовой турбины. Таким образом, количество энергии отдаваемой станцией в сеть в 1,5—2 раза превышает затраты энергии на закачку воздуха в аккумуляторы [1].

Комплекс на основе ВИЭ с воздушными аккумуляторами позволит решить проблему регулирования неравномерности электропотребления в период ее пикового спроса. В данной работе был рассмотрен вариант использования воздушных аккумуляторов в составе комплекса на основе ВИЭ. В качестве источника электроэнергии выступают ветроэнергетические установки и солнечные модули. Резервирование энергоснабжения осуществляется от дизельных установок. Воздушные аккумуляторы посредством компрессоров запасают воздух под давлением в периоды избытка энергии ВИЭ. В периоды дефицита энергии сжатый воздух подается на лопасти ветроустановки, таким образом, удастся решить проблему неравномерности ресурсов ВИЭ во времени.

Литература

1. **Тепловые** и атомные электрические станции. Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М. Энергоатомиздат, 1989.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА АВТОМАГИСТРАЛЯХ

подавляющее большинство автомагистралей и шоссе имеют неэлектрифицированные участки ввиду того, что подведение к ним линий электропередач дорого и (или) нецелесообразно из-за особенностей местности.

Решить эту проблему позволит использование альтернативных источников энергии, а в частности — энергии движения воздушных масс, вызванного таким антропогенным фактором, как движение автотранспорта.



Рис. 1. Схема устройства

Для этого может использоваться специальное устройство, включающее в себя несколько ветрогенераторов вертикального типа с ротором Савониуса, на которые воздушный поток воздействует дважды (на взаимно противоположные лопасти), что повышает эффективность устройства. Схема устройства показана на рис. 1.

Электроэнергия, получаемая от каждого из ветрогенераторов, подается на контроллер заряда и после преобразования поступает на аккумуляторную батарею для ее заряда, которая в свою очередь снабжает электроэнергией полезную нагрузку — объекты, устанавливаемые на автомагистралях и шоссе. Полезная нагрузка управляется специальным устройством управления для этого типа нагрузки.

Несмотря на небольшую мощность каждого ветрогенератора в отдельности, мощность устройства в целом будет достаточна для обеспечения объектов, потребляющих относительно большие мощности: в конечном итоге она будет зависеть от количества ветрогенераторов в нем, благодаря чему нагрузка может иметь различную потребляемую мощность.

Таким образом, использование предложенного устройства позволит устанавливать на неэлектрифицированных участках автомагистралей и шоссе такие объекты, как дорожные знаки с подсветкой, фонари, разделители полос с освещением, рекламные и информационные баннеры с подсветкой, светофоры и станции бесконтактной оплаты проезда.

Предложенное устройство позволяет решить проблему неэлектрифицированности участков автомагистралей и шоссе более экономным способом, чем подведение к ним линий электропередач.

И.Л. Рига, Ю.П. Иваненко, студенты; рук. М.М. Султанов, к.т.н., доц.
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВБЛИЗИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Согласно энергетической стратегии России до 2035 года главными стратегическими ориентирами долгосрочной государственной энергетической политики являются: энергетическая безопасность, энергетическая эффективность экономики, формирование рационального топливно-энергетического баланса, инновационная научно-техническая политика в энергетике.

Один из способов выполнения поставленных задач — создание малой генерации на основе возобновляемых источников энергии вблизи потребителя (рис. 1).

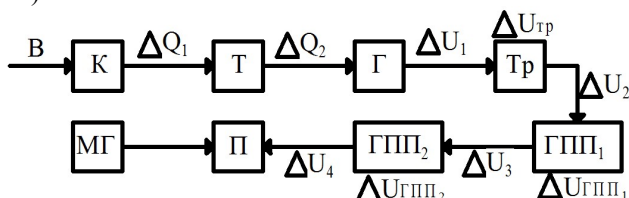


Рис. 1. Упрощенная схема энергетических потерь от ТЭС до потребителя: К — котел; Т — турбина; Г — генератор; Т — трансформатор; ГПП₁ — главная повышающая подстанция; ГПП₂ — главная понизительная подстанция; П — потребитель; МГ — малая генерация; B — количество затрачиваемого топлива, т.у.; ΔQ_1 , ΔQ_2 , ΔU_1 , $\Delta U_{тр}$, ΔU_2 , $\Delta U_{ГПП1}$, $\Delta U_{ГПП2}$, ΔU_3 , ΔU_4 — потери на станциях и в распределительных сетях, %

Предлагаемая схема обеспечит надежность энергоснабжения, уменьшит потери энергии в распределительных сетях, особенно если потребитель находится на значительном расстоянии от источника генерации. В результате эффективного распределения мощности между генераторами в энергосистеме значение потерь оптимизируются, и как следствие минимизируются расходы топлива на ТЭС, т.у.т, определяемые по формуле

$$B = f(N_{э}, Q_T, \Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta U_{ГПП1}, \Delta U_{ГПП2}, \Delta U_{Тр}), \quad (1)$$

где $N_{э}$ и Q_T — величина отпуска электрической и тепловой энергии на ТЭС, МВт.

Применение данной модели расчета для энергосистемы Волгоградской области на примере использования Красноярской МГЭС мощностью 1,5 МВт позволит сэкономить до 40 т.у.т в год, сжигаемого на ТЭС региона.

Я.Ю. Ровенко, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА с. НИКОЛЬСКОЕ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В работе рассматривается целесообразность внедрения ветроэлектрической станции (ВЭС) в локальный энергокомплекс (ЛЭК) на базе дизельной электростанции (ДЭС) с. Никольское.

Для выбора площадки под размещение ВЭС и выбора ее оборудования был проведен расчет и подробный анализ ветроэнергетических ресурсов в радиусе 10 км от местоположения ЛЭК. Моделирование скорости ветра на предварительно выбранной площадке ВЭС проводилось по многолетнему ряду наблюдений за скоростью ветра на площадке МС-аналога о. Берингово с сайта «Расписание погоды» (сайт: www.rp5.ru). Анализ ветровых ресурсов на площадке МС о. Берингово на высоте флюгера 10 м позволил сделать выводы: максимальные значения среднемесячной скорости ветра в разные годы наблюдаются с ноября по март (до 9,6 м/с), а минимальные значения приходятся на летние месяцы (до 5,7 м/с); энергию ветра наиболее целесообразно использовать в зимний период времени; учитывая значительный недостаток мощности в ЛЭК внедрение ВЭС целесообразно.

В соответствии с ГОСТ Р 51991-2002 и ГОСТ Р 54435- 2011 по данному СБД «Современное ветроэнергетическое оборудование» и учета графика нагрузки потребителей ЛЭК было выбрано 14 моделей ВЭУ и рассмотрена целесообразность их установки [1]. В результате расчетов были выявлены наиболее энергоэффективные варианты среди моделей ВЭУ с одинаковой высотой башни (от 30 до 55 м) по критерию наибольшего значения коэффициента использования установленной мощности $K_{\text{иум}}$: модель GEV MP C Vergnet ($H_б = 55\text{м}$), модель GEV MP R ($H_б = 30\text{м}$). Был проведен анализ влияния соотношения расчетной скорости ветра к наибольшей энергетической скорости (V_p^N/V_E) на энергоэффективность модели ВЭУ, где в качестве критерия энергоэффективности использовался $K_{\text{иум}}$.

Окончательный выбор типа и числа ВЭУ производился с учетом критериев финансово – экономической эффективности. По результатам сравнения наиболее энергоэффективных вариантов с экономической точки зрения была окончательно выбрана модель ВЭУ GEV MP C, производитель Vergnet, в количестве двух штук. Выбранные ВЭУ, работающие в комплексе в ДЭУ (в соотношении ВЭУ 51 %, ДЭУ 49 %), полностью покрывают график нагрузки рассматриваемого локального энергокомплекса.

Литература

1. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А. Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра». Заявл. 28.06.2012; опубл. 28.08.2012.

*Е.Б. Саматов, студ.; А.Б. Тоимбаев, докторант;
рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Эффективное замещение в топливном балансе систем промышленного и гражданского теплоснабжения ископаемых видов топлива (уголь, мазут, природный газ и др.) на практически неисчерпаемые ресурсы низкопотенциального тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием тепловых насосов является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды. Тепловая мощность действующего в мире парка тепловых насосов различного типа оценивается в 250 ГВт с годовой выработкой теплоты 1млрд.Гкал, что соответствует замещению органического топлива в объеме до 80 млн. т у. т/год [1].

Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка «Тепловой насос», позволяющая моделировать технические условия эксплуатации при различной холодопроизводительности компрессора.

В результате проведенных исследований были получены температурно-временные зависимости $t_k = f(\tau)$ температуры горячего источника в зависимости от условий эксплуатации теплового насоса (температуры низкопотенциального источника энергии t_H):

$$\text{при } t_H = 8 \text{ }^\circ\text{C } t_k = 1\text{E-}5 \tau^3 - 0,004 \tau^2 + 0,597 \tau + 8,547 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{при } t_H = 24 \text{ }^\circ\text{C } t_k = 6\text{E-}6 \tau^3 - 0,003 \tau^2 + 0,569 \tau + 15,79 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{при } t_H = 40 \text{ }^\circ\text{C } t_k = 2\text{E-}5 \tau^3 - 0,006 \tau^2 + 0,885 \tau + 9,507 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Анализ полученных результатов показал, что с повышением температуры низкопотенциального источника энергии наблюдается более интенсивный нагрев воды резервуара с расположенным в нем конденсатором.

Результаты данной работы могут быть использованы при оптимизации условий работы теплонасосных установок.

Литература

1. **Елистратов С.Л.** Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 2010.

В.Д. Свистунов, М.С. Богомолова, А.С. Лысова, студенты;
рук. А.Н. Викулов, асп. (НИУ «МЭИ»)

СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

В работе рассмотрено построение компактного и удобного в использовании генератора на основе эффекта Зеебека, который заключается в возникновении термоэлектрического тока или термоЭДС в замкнутой цепи последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру [1,3].

В замкнутой цепи термоЭДС пропорциональна разности температур:

$$E = a(T_1 - T_2) , \quad (1)$$

где E — термоЭДС; a — коэффициент термоЭДС; T_1 и T_2 — температура верхнего и нижнего контакта в цепи термоЭДС, соответственно [2].

Для получения термоЭДС использовался модуль Пельтье, который представляет собой объединение большого количества пар полупроводников p - и n -типа. Он имеет две стороны, одну из которых нужно охлаждать, а другую нагревать, создавая перепад температур, который, в свою очередь, создаст термоЭДС.

Вольт-температурная характеристика модуля Пельтье была получена экспериментальным путем с помощью двух термомпар и газовой плиты.

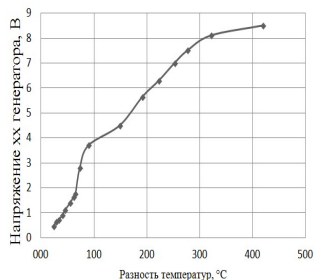


Рис. 1. Зависимость напряжения от разности температур

На основе этой характеристики была определена оптимальная разность температур модуля для работы с выходным напряжением 5 В. Был выбран наиболее эффективный вариант использования воды в качестве холодильника установки. В качестве источника тепла используется открытый огонь костра или свечи. Для лучшего контакта модуля Пельтье с охлаждающей и нагревающей частью места соединения были смазаны слоем термопасты.

В результате было изготовлено рабочее устройство электропитания, при должном нагреве обеспечивающее зарядку мобильного устройства.

Литература

1. Ильярский О.И., Удалов Н.П. Термоэлектрические элементы. М.: Энергия, 1970.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990.
3. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы, М.: Госэнергоиздат, 1956.

*Е.Г. Сема, А.В. Козлова, В.А. Портенко, студенты;
рук. Е.А. Черненко, к.т.н., доц. (СШФ СФУ, г. Саяногорск)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В современном мире трехмерная графика нашла применение в очень многих сферах: машиностроении, архитектуре, строительстве и многих других, в том числе и в энергетике. При помощи различных 3D-принтеров производится печать построенного в программе объекта. 3D-моделирование энергетического оборудования и объектов энергетики выполняется с целью проверки на моделях конструкторских концепций, дизайнерских решений, выявления возможных ошибок в чертежах до начала строительства объекта. Для студентов такое использование программного обеспечения является отличным способом подробного изучения энергетического оборудования и его отдельных деталей. Еще одним большим плюсом является не только возможность изучения готового напечатанного объекта, но и рассмотрение всех его конструктивных особенностей, при создании модели в программах трехмерной графики.

В работе рассматриваются этапы построения опорного изолятора.

Для создания объекта использовалась программа 3ds Max Autodesk, 16 версия, бесплатная студенческая.

На сайте производителя АО «НПО Изолятор» был выбран изолятор ОЛФ 10-А2 (изолятор опорный линейный) (рис.1).

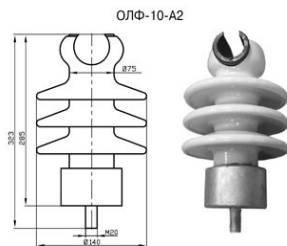


Рис. 1. Изолятор ОЛФ 10-А2 (изолятор опорный линейный)

Затем в программе 3ds Max был выполнен его чертеж в масштабе 1:4. Для удобства печати на 3D принтере изолятор был разделен на составные части. Далее были распечатаны элементы будущей модели изолятора на 3D принтере. И после обработки и склеивания всех частей получился макет. По итогам вышеописанных действий был построен и распечатан изолятор. Общее затраченное время составило 3 часа 10 мин, из них непосредственно на работу 3D-принтера — 1 час 12 мин.

*Д.С. Сычёв, асп.; рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

Основная причина образования трещин в бетонных конструкциях — неравномерное изменение температуры в них, возникающее в раннем возрасте вследствие экзотермии цемента, а в дальнейшем колебания температуры внешней среды. Температурные напряжения в плотинах в эксплуатационный период возникают в результате разности температур у граней плотины и внутри ее, а также вследствие невозможности массива плотины свободно расширяться (из-за связи с основанием) при сезонных и годовых колебаниях наружной температуры, проникающих глубоко внутрь массива (иногда охватывающих его полностью). В данной работе был разработан алгоритм проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов с учетом ограничений скорости изменения уровня воды верхнего бьефа, в зависимости от температурного состояния гидротехнического сооружения. Результаты расчета показали изменение основных энергетических показателей гидроэлектростанции [1, 2].

- Уменьшение полезного объема водохранилища на 13 %;
- Снижение гарантированной мощности на 6 %;
- Снижение среднесуточной выработки на 0,3 %.

Актуальность данной работы заключается в следующем. В современных условиях одной из основных статей дохода гидрогенерирующей компании является работа на оптовом рынке электроэнергии и мощности. Особенности дохода от работы в этом сегменте рынка является выбор оптимального режима работы станции с учетом требований безопасности гидротехнических сооружений и максимальной доходности.

Разработанный алгоритм предполагает дальнейшие его доработки с учетом практической особенности его применения для каждой конкретной станции или выбранного каскада ГЭС.

Литература

1. **Гидроэнергетика:** учебник для вузов / под ред. В.И. Обрезкова. М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Александровский А.Ю., Хасянов С.В.** Оценка влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на показатели работы ГЭС и каскада ГЭС // Вестник МЭИ. 2013. № 1.

К.М. Федоркив, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СЕТЕВОЙ ВЭС В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В работе рассматривается дополнение топливно-энергетического комплекса Кемеровской области крупной ветроэлектростанцией (ВЭС) мощностью 50 МВт для снижения энергодефицита, который составляет 9307 млн. кВт·ч (или 30 % от годового энергопотребления), и улучшения экологической ситуации.

Для выбора перспективных площадок под размещение ВЭС предварительно были построены карты распределения удельной мощности и среднемноголетней скорости ветра на высоте 10 м и 80 м по территории области. Построение карт проводилось по данным 20 метеостанций из баз данных «Флюгер» и «Погода России» [1]. Окончательно была выбрана площадка вблизи города Новокузнецк рядом с рекой Томь (координаты — 53,87° с.ш., 87,12° в.д.). Был также оценен валовой потенциал ветровой энергии региона на высоте флюгера 10 м - 2552,774 ГВт·ч в год.

Выбор энергоэффективной модели ВЭУ производился по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ из 17 предварительно отобранных вариантов в соответствии с ГОСТ Р 51991-2002 и ГОСТ Р 54435- 2011 по данным СБД «Современное ветроэнергетическое оборудование» [2]. В качестве дополнительного критерия использовался показатель удельной энергии с единицы ометаемой площади по ГОСТ Р 51991-2002. В результате расчетов были выбраны наиболее энергоэффективные варианты ВЭУ среди вариантов ВЭУ с одинаковой высотой башен: модель G87 (Made, $H_6 = 67$ м), модель G87 (Made, $H_6 = 78$ м), модель WWD-3-100 (Winwind, $H_6 = 80$ м).

В результате экономических расчетов был выбран окончательный вариант ВЭУ по критерию минимального срока окупаемости - модель WWD-3-100 (Winwind, $H_6 = 80$ м), срок окупаемости — 15 лет. Годовая выработка ВЭС с учетом потерь составила 90,52 млн. кВт·ч, что составляет 0,97 % от дефицита выработки электроэнергии в регионе. Для снижения энергодефицита на 30 % на территории данного региона рекомендуется построить около 30 ВЭС, аналогичных рассмотренной в данной работе.

Литература

1. **Российский** метеорологический сайт «Погода России». URL: <http://www.info.space.ru>
2. **Специализированная** база данных «Вертикальный профиль ветра» / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов. Заявл. 28.06.2012; опублик. 28.08.2012.

А.В. Фролова, А.А. Шигин, студенты;
рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Ветровой поток (ВП) характеризуется невозможностью точного прогнозирования изменения его скорости с течением времени. Поэтому можно считать, что мгновенная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ), пропорциональная скорости ветра, носит случайный характер [1]. При этом ВЭУ, работающие в локальной или единой энергосистеме, для обеспечения качества электроэнергии должны генерировать мощность, равную заданной нагрузке в каждый момент времени. Следовательно, для обеспечения надежного электроснабжения требуется регулирование мощности источника питания согласно нуждам потребителей.

Регулирование генерации ВЭУ с переменным числом оборотов ветроколеса (ВК) осуществляется электрически со стороны генератора, и механически путем изменения площади ВК, взаимодействующей с набегающим ВП. Эффективность электрического регулирования зависит от типа генератора: синхронный, асинхронный, асинхронизированный синхронный (АСГ) [2]. В ходе работы произведен сравнительный анализ вышеуказанных машин с точки зрения работы в составе ВЭУ. Кроме того, для АСГ, объединившего достоинства синхронной и асинхронной машин, был произведен ряд экспериментальных исследований, а именно:

- показана возможность поддержания требуемого уровня частоты и напряжения генерации при изменении скорости ветра в широком диапазоне;
- установлены зависимости активной мощности от механического числа оборотов ВК в подсинхронном и надсинхронном режимах, реактивной мощности – в режимах недо возбуждения и перевозбуждения.

Влияние системы регулирования угла настройки лопастей на выходную мощность также установлено опытным путем. Для этого были получены зависимости активной мощности генерации от скорости ветра для ВЭУ с постоянным и изменяемым углом поворота лопастей.

Таким образом, в работе оценены возможности ВЭУ с АСГ для стабилизации электросети и бесперебойного электроснабжения при значительных колебаниях скорости ВП.

Литература

1. **Андрианов В.Н.** Ветроэлектрические станции. М.:Госэнергоиздат, 1960.
2. **Manwell J.F.** Wind energy explained. Theory, design, application. Ch.: Wiley, 2009.

*К.Г. Шахаев, соиск. (АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»),
Б.Т. Шохзода, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СХЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Учитывая важность и актуальность данной темы, в работе предлагается автоматизировать расчет технико-экономических показателей для выбора оптимальной схемы энергоснабжения автономного потребителя на основе солнечной энергии.

Расчет предполагает выбор нескольких схем энергоснабжения автономного потребителя:

1. Солнечная электрическая станция (СЭС) полностью обеспечивает электроснабжение потребителя;
2. СЭС и сеть (СЭС+сеть) – автономный потребитель обеспечивается электроснабжением от солнечных батарей и электрической сети;
3. Солнечная электрическая станция и дизель генератор (СЭС+ДЭУ);
4. СЭС, солнечные коллекторы и сеть (СЭС+СК+сеть);
5. СЭС + СК+ ДЭУ;
6. Только ДЭУ.

Под СЭС понимается солнечная электрическая станция, включающая в себя солнечные батареи, аккумуляторы, инвертор, зарядное устройство и электрическое оборудование.

Параметры оборудования задаются в зависимости от схемы подключения элементов схемы [1]. Расчет ведется по среднечасовым значениям параметров. Блок-схема алгоритма представлена на сайте www.solarenergy.tj.

Автоматизация обработки информации приводит к упрощению расчетов, уменьшению погрешности расчетных данных, уточнению результатов расчета, экономии времени и т.п.

Литература

1. **Расчет** ресурсов солнечной энергетики: учебное пособие по курсам «Теоретические основы энергетики возобновляемых источников» «Проектирование и эксплуатация СЭС и ВЭС» / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательство МЭИ, 1998.

*В.В. Шестакова, студ.; рук. И.М. Кирпичникова, д.т.н., проф.
(ЮУрГУ, г. Челябинск)*

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ В КАЧЕСТВЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА

При посещении одного из торгово-развлекательных центров нашего города мы обратили внимание, что практически постоянный поток машин движется к парковочным местам. В вечернее и ночное время вся территория парковки освещается огромным количеством ламп. Но это требует больших энергозатрат. Государственная политика направлена на повышение энергетической эффективности экономики муниципальных образований путем, в том числе, увеличения количества объектов, использующих в качестве источников энергии разные виды источников (вторичные, возобновляемые). Таким образом, проблема энергосбережения является особенно актуальной на сегодняшний день. Мы подумали, что большой поток движущихся машин обладает значительным энергетическим потенциалом. Научная новизна исследования заключается в следующем: в качестве альтернативного источника энергии рассматривается автомобиль, при его движении на поверхность искусственной дорожной неровности передаются колебания, которые можно преобразовывать в электрические сигналы. Полученные таким образом электрические сигналы, накопленные в виде энергии в аккумуляторах, можно использовать в качестве автономного источника для питания приемников энергии. Мы предлагаем освещать подземную парковку комплекса в ночное время с помощью светодиодных ламп.

Существующие экспериментальные аналоги используют в своих разработках пьезоэлементы. Но это дорогостоящие технологии. Мы разработали и создали устройство преобразования механического воздействия (колебаний), возникающих при движении автомобиля, в электрическую энергию. Согласно произведенному расчету затрат, необходимых для изготовления одного устройства, срок окупаемости составляет 3,8 лет. При использовании большего количества платформ на одном объекте срок окупаемости их заметно сокращается.

Перспективы использования устройства с точки зрения энергетического, экологического и экономического эффекта широки: другие площадки повышенной проходимости (гипермаркеты, развлекательные центры). Данное устройство незаменимо как автономный источник на расположенных вдали от электрических цепей объектах (например, автозаправочных станциях), что позволит решить проблемы социально-экономического характера.

*А.Л. Шестакова, асп.; рук. И.М. Кирпичникова, д.т.н., проф.
(ЮУрГУ, г. Челябинск)*

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, ОТРАЖЕННЫЕ В ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВЕ РФ (НА ПРИМЕРЕ УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА)

Развитие возобновляемых источников энергии является одним из ключевых направлений в мировой энергетике. На фоне низких цен на углеводородное топливо в 2015 году в сфере альтернативной энергетики увеличена выработка энергии, и к тому же возрос объем инвестиций в проекты, связанные с возобновляемыми источниками энергии [1].

Несмотря на то, что Уральский федеральный округ относится к энергодефицитным регионам, как показывает мировой опыт, нетрадиционные источники энергии могут покрывать определенное количество потребности тепловой, электрической энергии и органического топлива. В связи с этим в регионе принята Стратегия социально-экономического развития Уральского федерального округа на период до 2020 года, которая в качестве перспектив выделила развитие существующих и создание новых объектов генерации на основе использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии для обеспечения районов нового освоения и преодоления прогнозного энергодефицита [2].

В 2015 году Ассоциация малой энергетики планирует совместные проекты с чешскими компаниями в сфере нетрадиционной энергетики, в частности, строительство погружных мини-ГЭС мощностью от 1 МВт на одной из многочисленных уральских рек. На Коркинском угольном разрезе предусмотрено строительство электростанции, топливо для которой получено способом пиролиза. В апреле 2016 года на Челябинском заводе компании «Российские электрические двигатели» на территории технопарка «Станкомаш» начато производство оборудования для ветровой энергетики на Урале

Развитие возобновляемой энергетики предполагает определенные вложения, и рынок сам по себе не может решить эту проблему. Необходима государственная стратегия развития отрасли и меры законодательного стимулирования.

Литература

1. **Андрианов В.** Альтернативная энергетика: с нефтью и газом Россия простится последней // Нефтегаз, вертикаль. 2016. № 5. С. 40—44.
2. **Распоряжение** Правительства РФ от 6 октября 2011 г. N 1757-р «Стратегия социально-экономического развития Уральского федерального округа на период до 2020 года» (в ред. Постановления Правительства РФ от 26.12.2014 г. № 1505).

ЭЛЕКТРОФИЗИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Председатель секции — к.т.н., доцент Я.Л. Арцишевский

Секретарь секции — к.т.н., доцент А.В. Орлов

*Е.Л. Анохина, студ.; рук-ли С.В. Белоусов, к.т.н., доц.;
Д.И. Ковалёв, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ВЫПУСКА КОМБИНИРОВАННОГО ФИЛЬТРА

Производственные предприятия негативным образом влияют на окружающую природную среду за счет выбросов в воздушный бассейн, которые регламентируются на государственном уровне.

Одним из способов снижения выбросов является установка различных типов фильтров. В данной работе оценивается необходимость создания нового типа фильтра – комбинированного, соединения рукавного и электрофильтра.

Потребность нового вида фильтров обусловлена применением их при улавливании высокоомных пылей, приводящих к обратной короне, когда другие методы борьбы с обратной короной не дают положительного результата. Целесообразность производства комбинированного фильтра объясняется тем, что по сравнению с аналогами фильтр допускает работу с более высокой входной запыленностью 200 г/м^3 при улавливании высокоомной и абразивной золы, выходная запыленность снижена до 20 мг/м^3 . Степень очистки комбинированного фильтра составляет 99,89%, когда у электрофильтра 95,1-99,79%. Одновременная работа рукавного и электрофильтра позволяет снизить текущие затраты эксплуатации на 30%, сокращает используемое пространство на станции в 1,5 раза [1, 2].

Основными объектами установки предлагаемой разработки являются электрические станции, работающие на угле, среди них Гусиноозерская ГРЭС, 1130 МВт, ряд Иркутских ТЭЦ мощностью 166-1110 МВт и др.

Для оценки эффективности проекта по производству комбинированных фильтров была сформирована экономическая модель, с использованием программного комплекса Project Expert. Расчет показателей эффективно-

сти проекта показал, что срок окупаемости проекта составляет 6,5 лет, чистый дисконтированный доход положителен, внутренняя норма доходности 25,90 %, что больше нормы дисконта. Также был произведен анализ рисков и неопределенности на основе изменения различных факторов и критериев внешнего окружения.

По результатам проведенного комплексного анализа очевидно, что данный продукт экономически эффективен, будет иметь спрос на рынке промышленности, и в частности в области электроэнергетики.

Литература

1. **Мазур И.И., Шапиро В.Д.** Управление проектами. М.: ОМЕГА-Л, 2010.
2. **Санаев Ю.И.** Обеспыление газов электрофильтрами. Семибратово: Кондор-Эко, 2009.

УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЗАРЯДОВ

Электрические поля промышленной частоты (ЭППЧ) установок высокого напряжения (УВН) рассчитываются и анализируются в процессе разработки УВН для обеспечения надежной и безаварийной работы электрических аппаратов, машин, воздушных линий электропередачи (ВЛ) и т.п., а также для оценки их влияния на окружающую среду [1].

Одним из методов, применяемых для расчета ЭППЧ УВН, является метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) [1]. Наиболее широко он используется при изучении полей ВЛ. Расчет полей при помощи МЭЗ сопровождается вычислительными погрешностями, которые возникают из-за накопления погрешностей округления в процессе реализации вычислительного алгоритма на ЭВМ. В частности, они проявляются при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно значений эквивалентных зарядов. Поэтому при практической реализации МЭЗ большое значение имеет выбор численного метода решения СЛАУ.

В работе рассмотрены и сопоставлены результаты применения в МЭЗ четырех методов [2]: Гаусса, LU -разложения, QR -разложения и наименьших квадратов (МНК). Первые три метода строго решают исходную систему и отличаются вычислительными погрешностями при больших значениях числа обусловленности матрицы коэффициентов СЛАУ. МНК ищет такое решение системы, которое минимизирует среднеквадратичное отклонение левых и правых частей СЛАУ. При этом уравнений в СЛАУ должно быть больше, чем ее переменных. В приложении к МЭЗ это означает, что количество контурных точек, в которых требуется выполнение граничных условий, должно быть больше числа эквивалентных зарядов, что позволяет дополнительно уточнить расчет параметров поля.

Автором получены результаты, говорящие о возможности применения метода наименьших квадратов в вычислительном алгоритме МЭЗ, а также о его преимуществе по сравнению с альтернативными методами решения СЛАУ при расчете электрических полей сложной конфигурации.

Литература

1. Колечицкий Е.С., Романов В.А., Карташев В.Г. Защита биосферы от влияния электромагнитных полей: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. Вержбицкий В.М. Вычислительная линейная алгебра: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2009.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА ФОРМУ И АМПЛИТУДУ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Частичные разряды (ЧР) являются основной причиной необратимого ухудшения свойств (старения) изоляционных конструкций и приводят к уменьшению их срока службы. Одной из основных характеристик ЧР при измерениях электрическими методами является величина «кажущегося разряда», численно равная произведению регистрируемого броска напряжения на емкость изоляции [1].

В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о степени корреляции между измеряемым броском напряжения при ЧР и характеристиками дефекта изоляции. При регистрации ЧР в виде затухающего колебательного процесса авторы работ [2, 3] часто не оговаривают, как определяется величина кажущегося заряда и какие характеристики процесса связаны с дефектом, а какие являются свойствами измерительной цепи.

В докладе сообщается о результатах компьютерного моделирования в среде Multisim дефектов с частичными разрядами (ЧР). Имитация процесса частичного разряда осуществлялась замыканием и размыканием ключа, включаемого параллельно емкости и сопротивлению дефекта.

Показывается, что амплитуда и форма сигнала ЧР в значительной степени зависит от развязки источника напряжения и участка изоляции с ЧР. Такая развязка при моделировании осуществлялась введением в схему индуктивности и активного сопротивления. Утверждается, что регистрируемая полярность ЧР зависит от градиента напряжения в момент ЧР, который часто имеет случайный характер возникновения, что приводит к кажущемуся противоречию с теорией ЧР в многослойной изоляции. Делается заключение, что колебательный характер переходных процессов при ЧР зависит в основном от параметров подводящих цепей и слабо связан с самим ЧР.

Литература

1. **Вдовико В.П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
2. **Nenad Kartalović, Dragan Kovačević, and Srđan Milosav Ijević.** An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation // FACTA UNIVERSITATIS SER.: ELEC. ENERG. April 2011. Vol. 24. No 1. P. 41—55.
3. **Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е.** О проблемах применения электрического метода регистрации частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. Екатеринбург: Автограф, 2010. С. 39—48.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В СТАТОРАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В ОНЛАЙН- И ОФЛАЙН-РЕЖИМАХ

Турбогенераторы (ТГ) является основным элементом электроэнергетических систем и электрических станций. Контролю состояния изоляции ТГ во всем мире уделяется большое внимание, разрабатываются новые и совершенствуются старые методы контроля. Одним из успешных и повсеместно используемых методов контроля состояния изоляции ТГ является метод измерения частичных разрядов (ЧР) в обмотках статора ТГ. Измерение ЧР дает возможность обнаруживать слабые и поврежденные места изоляции стержней статора на ранней стадии развития нарушений. Это позволяет своевременно провести их устранение при проведении профилактических и ремонтно-восстановительных работ [1,2].

Главными факторами, влияющими на характеристики ЧР, являются следующие: нагрузка ТГ, состояние системы охлаждения и окружающей среды (влажность, загрязнение), индивидуальные особенности конструкции и дизайна генератора [2—4].

В работе сообщается о результатах исследования особенностей наблюдения частичных разрядов (ЧР) в статоре турбогенератора (ТГ) ТВФ-60-2 при его работе в сети. Показывается, что для правильной интерпретации результатов измерения ЧР в ТГ необходимо знать схему соединения стержней различных ветвей фазных обмоток и порядок их расположения в пазах статора; схемы их пересечения в лобовых частях и распределение напряжения по стержням в пазовой и лобовой части ТГ. Вследствие того, что последовательно соединенные стержни статорной обмотки имеют различный потенциал относительно земли, условия возникновения ЧР в каждом стержне в пазовой и в лобовой части существенно различаются, а фаза возникновения ЧР становится неоднозначным параметром.

Литература

1. **Hutter W.** Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1992. Vol. 8. No 3. P. 21—32.
2. **ГОСТ ИЕС/TS 60034-27.** Машины электрические вращающиеся. Часть 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин М: Стандарты, 2015. 55 с.
3. **Hoof M., Lanz S.** PD Diagnostics on Rotating Machines Possibilities and Limitations // Electrical Insulation Conference - Cincinnati, USA. Oct.1999. P. 195—200.
4. **Русов В.А.** Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367 с.

А.Е. Басова, студ.; рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ВЫБОРА УСТАВОК ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Продольная дифференциальная токовая защита (ДТЗ) без торможения получила широкое применение в качестве основной защиты на линиях и других элементах электрических сетей и электростанций. Основным расчетным условием для выбора тока срабатывания ДТЗ является отстройка от тока небаланса, обусловленного погрешностями трансформаторов тока (ТТ) в переходном режиме внешнего короткого замыкания (КЗ) [1]:

$$I_{с.з} = K_{отс} I_{нб.макс} = K_{отс} \varepsilon K_{одн} K_{пер} I_{к.расч.макс}, \quad (1)$$

где $K_{отс} = 1,3-1,5$ – коэффициент отстройки; ε – относительное значение полной погрешности по току ТТ, соответствующее установившемуся режиму КЗ; $K_{одн}$ – коэффициент однотипности ТТ; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (апериодическую составляющую тока КЗ).

При использовании в защите однотипных ТТ, выбираемых по кривым предельной кратности при 10%-ой погрешности, $\varepsilon = 0,1$, $K_{одн} = 0,5$. При отсутствии в измерительном органе тока отстройки от влияния апериодической составляющей $K_{пер} = 2$. При указанных значениях ток небаланса

$$I_{нб.п.макс} = \varepsilon K_{одн} K_{пер} I_{к.расч.макс} = K_{нб} I_{к.расч.макс} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 2 = 0,1 I_{к.расч.макс}. \quad (2)$$

Целью работы являлась проверка обоснованности значений коэффициентов, входящих в расчетные выражения (1) и (2). Для проверки использовалось имитационное моделирование в системе Matlab. Имитационная модель включала модель защищаемого объекта – трехфазной ЛЭП с двусторонним питанием, модели ТТ, измерительного органа тока, средства измерений и визуализации. При исследованиях определялись значения: ε , $K_{пер}$ и $K_{нб}$ с учетом влияния различия характеристик намагничивания ТТ по концам ЛЭП, остаточной индукции в магнитопроводах ТТ, постоянной затухания апериодической составляющей тока КЗ, величины вторичной нагрузки ТТ. Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что при установке по концам ЛЭП ТТ с наилучшими и наихудшими характеристиками намагничивания $\varepsilon_{макс} \approx 0,3$, $K_{пер.макс} \approx 3$, чему соответствует $K_{нб.макс} \approx 0,09$. Таким образом, хотя действительные значения ε и $K_{пер}$ могут отличаться от рекомендуемых расчетных значений, в целом результирующее значение $K_{нб}$ примерно соответствует значению, получаемому при использовании существующей методики расчета тока срабатывания ДТЗ.

Литература

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.

*Е.А. Брызгалов, студ.; рук-ли Г.А. Филатова, ст. преп.;
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ УСТРОЙСТВА 7SA52

В энергетике нередко применяются устройства, произведенные зарубежными компаниями, которые обладают своими отличительными особенностями. Знания по различным аспектам их применения дают будущим специалистам преимущества на рынке труда и помогают в дальнейшем лучше ориентироваться в области релейной защиты.

Устройства защиты фирмы Siemens зарекомендовали себя как надежные устройства, обладающие всеми необходимыми функциями, реализующими преимущества использования микропроцессорной элементной базы, такими как гибкая CFC логика, встроенные алгоритмы ОМП, осциллографирование и т.п. [1, 2].

В ходе работы был изучен терминал дистанционной защиты Siemens SIPROTEC 7SA52 с помощью испытательного комплекса Ретом-51. Первоочередной задачей являлось изучение стандартных функций устройства, правил подключения устройства к цепям тока и напряжения, способов организации выходных цепей. Особое внимание уделялось организации связи терминала с персональным компьютером и процессу конфигурирования с помощью программного комплекса DIGSI 4.

Для проверки терминала был рассмотрен участок электрической сети, рассчитаны параметры срабатывания дистанционной защиты одной из линий 110кВ. Далее устройство было настроено в соответствии с результатами расчета и проверено с помощью комплекса Ретом-51, а именно были построены экспериментальные характеристики срабатывания реле сопротивления терминала, оценена работа алгоритма определения места повреждения, проанализированы осциллограммы токов и напряжений при различных видах повреждений. Так же, с помощью CFC-логики, была разработана функция, реализующая возможности терминала по представлению пользователю информации о событиях, такие как светодиодные индикаторы, вывод сообщений на дисплей терминала.

Результаты работы (пример расчета дистанционной защиты ЛЭП 110 кВ для заданной сети, описание программы проверки терминала 7SA52, создание функций гибкой логики) используются в обучении магистрантов в курсе «Микропроцессорные устройства релейной защиты».

Литература

1. **SIPROTEC 4**. Системное описание // Siemens 2007 г. Версия: 04.10.07. URL: <http://smart-grid.siemens.ru/files/91199.pdf>
2. **DIGSI CFC**. Руководство по эксплуатации // Siemens 2007 г. Версия 11.06.07 URL: <http://smart-grid.siemens.ru/files/91203.pdf>

*С.П. Васильев, Н.В. Воронцов, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗВОДКИ СХЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ УГЛА ТРАССИРОВКИ ИЗГИБА ПРОВОДНИКА

При изучении причин сбоя в работе электроэнергетического оборудования большое внимание уделяется вопросам возникновения пробоя в разводке его электрических схем. Характер проводящего рисунка разводки схем во многом определяет технологичность и надежность электротехнических устройств. Наличие острых углов в деталях и в узлах разводки электронной аппаратуры создает концентрацию электрического поля [1]. Заряды, растекаясь по поверхности проводника, создают большую поверхностную плотность в областях острых углов. А высокая их плотность означает сильное электрическое поле, что и приводит к возникновению пробоя изоляции вблизи острых углов проводника.

В процессе проведенных расчетов было исследовано, с помощью современной программы ELCUT, влияние различных форм изгибов проводников на распределение электрического поля вблизи них [2]. В ходе работы были построены и проанализированы математические модели острыми и с закругленными изломами для расчета распределения электрического поля. Из проведенных расчетов выяснено, что наиболее эффективным способом минимизации возможности пробоя изоляции является использование проводников с округленными изгибами. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с уровнем пробивной напряженности электрического поля диэлектрика исследуемой модели. Вычислена зависимость силовой характеристики электрического поля от угла трассировки изгиба проводника.

Полученные результаты позволяют увеличить сроки безаварийной работы электротехнического оборудования, а следовательно, продлить их сроки службы, за счет оптимальной разводки электрических схем.

Литература

1. **Кадах В.А., Морсин И.А., Козьмина И.С.** Исследование электростатических полей проходных изоляторов для высоковольтных вводов трансформаторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т. 3. С. 267.
2. **Рахимов Д.Р., Швецова Е.В., Козьмина И.С.** Анализ электрического поля для оптимизации бумажно-маслянной конденсаторной изоляции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т. 3. С. 273.

*Р.В. Васильев, асп.; рук-ли А.А. Волошин, к.т.н., ст. преп.;
Е.А. Волошин, асс. (НИУ «МЭИ»)*

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Применение современных информационных технологий для реализации функций релейной защиты и автоматики (РЗА) вызывает необходимость разработки новых подходов к созданию систем РЗА для повышения уровня их технического совершенства и обеспечения их эффективности и надежности функционирования [1].

Передача мгновенных значений токов и напряжений, а также сигналов и команд по локальным вычислительным сетям в соответствии с МЭК 61850 позволяет использовать для выполнения функций РЗА специализированные промышленные компьютеры (СПК) вместо традиционных МП терминалов. Важным отличием СПК от традиционных МП терминалов является отсутствие плат ввода/вывода и свободное конфигурирование состава выполняемых функций РЗА. СПК формируют универсальную технологическую платформу для создания функционально интегрированных систем РЗА с гибкой функциональной архитектурой (ФИС РЗА). Для формирования гибкой функциональной структуры ФИС РЗА требуется применение специализированных оптимизационных методов (ОМ).

В рамках данной работы были разработаны два ОМ синтеза функциональной структуры релейной защиты и автоматики для разных стадий жизненного цикла РЗА (разработка и эксплуатация) в виде программного обеспечения на языках программирования MATLAB и AnyLogic (Java), проведены необходимые опыты и получены подтверждающие результаты. Разработанные ОМ на базе генетического алгоритма [2] и мультиагентных систем [3] используются для создания программного обеспечения САПР РЗА и программного обеспечения интеллектуальных систем РЗА.

Литература

1. **A. Voloshin, Ya. Arcishevskiy, A. Zhukov.** Principles of Creation of Intelligent Systems of Relay Protection and Automation // 5th International Scientific and Technical Conference «Actual trends in development of power system relay protection and automation», 2015.

2. **Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. С. 432.

3. **Silvano Martello, Paolo Toth.** Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations. 1990.

*В.В. Воеводин, асп.; Н.А. Киселёв, инж. (ООО «Сириус», Москва);
рук. М.В. Соколова, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)*

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА

Поверхностный разряд (ПР) нашел применение в различных электро-технологических установках. Вместе с тем, продолжаются исследования физических процессов в разрядной зоне и поиск возможностей по оптимизации работы устройств на базе ПР. Одним из вариантов оптимизации является питание ПР импульсным высоким напряжением.

В настоящей работе был проведен анализ структуры ПР путем регистрации излучения разряда в видимом спектре при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom v2511. В качестве импульсного источника питания использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) с наносекундным фронтом, разработанный и изготовленный в ИЭЭ РАН [1]. Электродная система представляла собой полосу из никеля шириной 1 мм, нанесенную на керамическую пластину марки 22ХС. С обратной стороны пластины находился сплошной электрод.

В ходе эксперимента установлено, что на фронте кривой импульсного напряжения возможно существование двух форм ПР – достаточно ярких контрагированных каналов и относительно тусклых областей с почти равномерным (диффузным) свечением. При питании напряжением положительной полярности наблюдается большое число микроразрядов первого типа. При отрицательной полярности в ПР преобладает диффузная форма разряда. Структура обратного разряда, возникающего на спаде кривой импульса напряжения, идентична для обеих полярностей. Она представляет собой область тусклого диффузного свечения с резкими ярко светящимися пятнами малого размера у края электрода.

При питании синусоидальным напряжением, на положительном полупериоде также наблюдается большое число контрагированных каналов. Структура ПР на отрицательном полупериоде аналогична структуре обратного разряда при импульсном питании. Фотографии разряда на синусоидальном напряжении, повторяют полученные в работе [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №15-08-04384.

Литература

1. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. Полупроводниковый генератор высоковольтных прямоугольных импульсов для питания барьерного разряда // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71—75.
2. Sokolova, M., Hulka, L. and Pietsch, G. J. Influence of a Bias Voltage on the Characteristics of Surface Discharges in Dry Air // Plasma Processes Polym. 2005. № 2: 162–169.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ ТРУБКИ КОНЦЕВОЙ МУФТЫ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В электроэнергетике широко используются кабельные линии. Для подключения кабелей к различной нагрузке и соединения друг с другом используются кабельные муфты. Муфты представляют собой комплект деталей и материалов, обеспечивающих восстановление электрической, конструктивной и механической целостности кабеля. Различают соединительные, ответвительные и концевые муфты. Концевые предназначены для соединения кабелей с разными электрическими приборами и аппаратами. Для повышения надежности муфты и ее защиты от пробоя изоляции применяется специальная трубка, выравнивающая напряженность электрического поля на конце кабеля. За счет сглаживания краевого эффекта можно уменьшить вероятность пробоя изоляции кабеля в местах его подключения с аппаратурой [1].

В работе были проведены расчет и анализ электрического поля в концевой кабельной муфте. Была построена модель концевой муфты (токоведущий стержень, охваченный «цилиндрической» формы изоляции, при наличии выравнивающей трубки) с помощью программы ELCUT. На полученной модели показаны места наиболее вероятного электрического пробоя при различных конструкциях выравнивающей трубки [2]. Проведенные расчеты позволили оценить степень уменьшения максимальной напряженности электрического поля при использовании выравнивающей трубки в зависимости от ее материала, размеров и конструкции. Результаты выполненной работы могут быть использованы при оптимизации конструкции концевой муфты, используемой для соединения кабеля с электроэнергетическим установками, с целью уменьшения вероятности пробоя изоляции.

Литература

1. **Кадах В.А., Морсин И.А., Козьмина И.С.** Исследование электростатических полей проходных изоляторов для высоковольтных вводов трансформаторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т.3. С. 267.
2. **Рахимов Д.Р., Швецова Е.В., Козьмина И.С.** Анализ электрического поля для оптимизации бумажно-маслянной конденсаторной изоляции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т. 3. С. 273.

С.Э. Гармашук, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ (MATLAB, PSCAD, RSCAD) АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

На сегодняшний момент неоспоримым является факт того, что одной из важнейших проблем в электроэнергетики является точное измерение параметров электроэнергии. Это необходимо прежде всего для того чтобы обеспечивать потребителей качественной электроэнергией согласно требованиям, прописанных в ПУЭ. А также, что наиболее важно — для нормального функционирования устройств автоматики электроэнергии и устройств релейной защиты.

Измерения зачастую осуществляются с помощью известных программных средств, таких как MATLAB, PsCAD, RsCAD, PSAT и другие. В данной работе проведен обзор существующих программных алгоритмов измерительных преобразователей частоты. Как известно, каждый алгоритм по своему принципу работы не может выдать абсолютно верный результат. Всегда будет присутствовать погрешности при измерениях. Это называется и в том, что в разных режимах электроэнергии, различные программные средства могут выдавать результат с различной погрешностью. Именно поэтому в данной работе изучены погрешности измерения различных видом электрических сигналов, а также при наличии различных помех. Также на основе полученных результатов будет произведена возможная модернизация существующих алгоритмов измерения [1].

Литература

1. **Черных И.В.** "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем"
URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЗАРЯДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Одним из известных и эффективных методов расчета электростатических полей является метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) [1]. В его рамках реальное поле зарядов, распределенных по поверхности проводников полеобразующей системы, заменяется полем системы эквивалентных зарядов (ЭЗ), размещенных внутри проводника по некоторой фиктивной поверхности. Их значения вычисляются исходя из требования выполнения граничных условий в контурных точках на поверхности проводников.

Применение МЭЗ на практике встречает некоторые трудности.

Во-первых, выбор числа и взаимного расположения ЭЗ неоднозначен. Известны рекомендации для соотношений глубины их залегания под поверхностью проводника, расстояния между ними и радиуса закругления поверхности [2]. Размещение зарядов в соответствии с этими рекомендациями обеспечивает инженерную точность расчета значений напряженности поля в пространстве между проводниками (3÷5%). Но рекомендуются не конкретные значения упомянутых соотношений, а их допустимый диапазон. Выбор размещения ЭЗ в его рамках осуществляется неоднократным просчетом вариантов, выбираемых методом проб и ошибок.

Во-вторых, из-за дискретного характера ЭЗ нужно размещать большое их число для достижения удовлетворительной точности. Это зачастую приводит к погрешностям расчетных значений ЭЗ [2].

В работе предлагается направление усовершенствования МЭЗ и решения этих проблем, связанное с применением функционально-зависимых эквивалентных зарядов, развивающее идеи, предложенные в статье [3]. Суть методики заключается в использовании распределенных ЭЗ в виде полос или других простых слоев заряда с поверхностной плотностью, изменяющейся по заданному закону. В простейшем случае будет использовано кусочно-линейное распределение заряда. Значение его плотности в узлах находится из граничных условий в контурных точках.

Литература

1. **Верещагин И.П., Гусаров А.А., Бобиков В.Е.** Применение регуляризации в методе эквивалентных зарядов // Энергетика и транспорт. 1981. № 2.
2. **Гусаров А.А., Бобиков В.Е.** Расчет электростатических полей методом эквивалентных зарядов // Электричество. 1979. № 2.
3. **Кривов С.А., Морозов В.С.** Модифицированный метод эквивалентных зарядов расчета плоскопараллельных полей // Известия АН. Энергетика. 1993. № 1.

Б.М. Гиёев, асп.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМАНД АЧР НА УРОВНЕ 0,4 кВ

Новые технические возможности, современные тенденции и наличие новых требований к надежности электроснабжения [2] требуют расширить функции устройств управления мощностью нагрузок в нормальных и в аварийных режимах. К таким устройствам относится подсистема противоаварийной автоматики устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР). Для большей гибкости отключения и учета приоритетности ответственных электроприемников при противоаварийном ограничении нагрузки предлагается перевод команды устройств АЧР на уровень 0,4 кВ. Достижение данной цели осуществляется путем интеграции модифицированных счетчиков система АИИСКУЭ и существующей системы АЧР.

Рассматривается два основных варианта технической реализации перевода команд АЧР на уровень 0,4 кВ [1], которые не требуют значительных расходов на развертывания сети связи, но прогнозируется получения эффекта энергосистема с активно-адаптивной сетью и соответствуют требованиям интеллектуальных распределительных сетей в соответствии с концепцией EnergyNet.

Первый вариант микропроцессорные счетчики АИИСКУЭ в сети 0,4 кВ, имеющих контакты управления нагрузкой, который дает возможность в их алгоритм заложить функции измерения частоты и в целом функции АЧР.

Второй вариант использование модифицированных счетчиков с функцией измерения провала напряжения. Этот вариант дает возможность передачи команд на уровень 0,4 кВ путем отключения и включения силового выключателя 10 кВ от существующего устройства АЧР, установленного на уровне 10 кВ.

Оба варианта имеют рекомендуемые области применения реализации команд АЧР при аварийном ограничении нагрузки 0,4 кВ.

Данные варианты были рассмотрены авторами и получены соответствующие результаты моделирования процессов снижения частоты и реализации команд АЧР на уровне 0,4 кВ в программе PSCAD.

Литература

1. **Эдельман В.И.** Развитие механизмов управления надежностью электроснабжения в современных условиях. Библиотечка электротехника. №8 (200). М.: Энергопрогресс. 2015. 131 с.
2. **Гиёев Б.М., Арцишевский Я.Л.** Надежность электроснабжения ответственных потребителей 0,4 кВ при действии АЧР. // Материалы XXII Международной научно-технической конференции ТРАВЭК-2015. Москва, 2015.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ В СОБСТВЕННЫХ НУЖДАХ СТАНЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЕТАР

Повышение надежности энергоснабжения — с такой задачей встречаются инженеры-энергетики с момента появления первой электропередачи. Для успешного ее решения принимается комплекс мер, одним из которых является повышение надежности производства электроэнергии на электрических станциях (ЭЛС). Ведущую роль в функционировании ЭЛС выполняют собственные нужды (СН).

Двигатели СН чрезвычайно важны. Они участвуют в переработке и подаче топлива, циркуляции рабочего тела, охлаждении оборудования, соблюдении экологических стандартов. Даже кратковременная потеря питания СН может стать фатальной для работоспособности ЭЛС и безопасности ее агрегатов [3]. Именно по этой причине важно обладать актуальной информацией о режиме работы двигателей, подключенных к шинам СН.

В работе была смоделирована типовая ЭЛС в программном комплексе ЕТАР, произведены расчеты группового самозапуска двигательной нагрузки СН при различных начальных возмущениях. Результаты были сравнены с аналогичными, рассчитанными по [1].

Проанализировав вышеописанное [2], был сделан вывод о значительном преимуществе расчета в программном комплексе над [1]. Результаты, полученные в ЕТАР, являются более достоверными, чем с помощью приближенных методов. Их применение целесообразно для оптимальной настройки автоматики и позволяет гарантировать групповой самозапуск двигательной нагрузки СН и как следствие надежную работу ЭЛС.

В перспективе результаты проведенных исследований можно использовать при разработке методики современного расчета выбега и самозапуска двигательной нагрузки СН, что обеспечит более надежную работу ЭЛС и электроснабжение потребителей.

Литература

1. **СО 34.47.616.** Методика расчета режимов перерыва питания и самозапуска электродвигателей 3-10 кВ собственных нужд электростанций упрощенными методами.
2. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. **Курбангалиев У.К.** Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. М.: Энергоиздат, 1982.

В.И. Ермакова, студ.; рук-ли М.Г. Тягунов, д.т.н., проф.;
В.Н. Винокуров, асс. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР УЧАСТНИКОВ РЫНКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Отвечая глобальным тенденциям с 2013 года в России на законодательном уровне существует стимулирование использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности [1].

Ветроэнергетика является сложившимся и развивающимся направлением возобновляемой энергетики в мире. Однако Россия, несмотря на ветроэнергетический потенциал и наличие более 65 % территорий, не охваченных единой энергетической сетью [2], еще находится в начале развития данного направления. Государственная поддержка проектов ветроэнергетики доступна только объектам с достаточным уровнем локализации оборудования [3] и конкурентными удельными капитальными затратами. Для выполнения данных условий необходимо создание новых или переоборудование существующих промышленных предприятий для производства на территории России оборудования для ветроэнергетики.

Состояние и интересы участников рынка в России требуют комплексного рассмотрения, для выявления острых потребностей и актуальных направлений развития отрасли.

Исследование заключается в определении всех возможных заинтересованных сторон рынка ветроэнергетики в России, их вызовов, их власти и их интересов. Использованные методы исследования: обзор доступных источников, анкетирование, личные встречи. Исследование даст информацию, которая необходима для структурирования проектов по производству оборудования для достижения требуемого уровня локализации в ветроэнергетике и снижения капитальных затрат в проектах ветроэнергетики.

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 28.05.2013 N 449 (ред. от 17.02.2014) "О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности".
2. **К обоснованию** параметров ветродизельных энергокомплексов с учетом местного ветрового климата и графиков электрической нагрузки / С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов, В.Г. Николаев и др. // Возобновляемая и малая энергетика 2016: Тр. Междунар. ежегод. конф. М.: Комитет ВЭИ РосСНИО, 2016.
3. **Постановление** Правительства РФ от 23 января 2015 г. N 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии».

Д.Г. Ефремов, асп.; рук. И.З. Глускин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ МАХОВИКОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

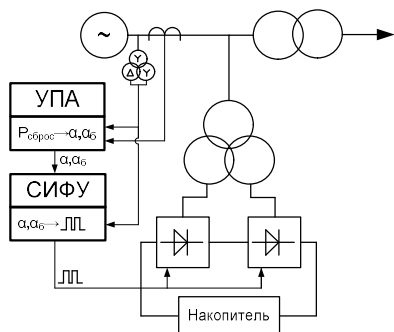


Рис. 1. Система управления накопителем: УПА — устройство противоаварийной автоматики; СИФУ — система импульсно-фазового управления

Разработана система управления маховиковым накопителем, данная система приведена на рис. 1.

Разработанная система управления маховиковым накопителем позволяет в автоматическом режиме на основе величины сброса мощности генератора определять требуемые углы открытия тиристорных преобразователей для компенсации разгоняющей мощности в режиме КЗ маховиковым накопителем и обеспечивать динамическую устойчивость параллельной работы генератора.

Литература

1. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II. М.: Знак, 2011.

Ранее было проведено исследование эффективности применения накопителей энергии различного вида для повышения динамической устойчивости электрической станции (ЭС) при коротких замыканиях (КЗ) [1]. Исследование показало, что одним из наиболее эффективных накопителей является маховиковый накопитель энергии, а также предлагается система управления данным накопителем на ЭС при КЗ. В частности, были проведены исследования различных типов приводов маховикового накопителя, которые показали, что наиболее целесообразным типом привода для маховикового накопителя являются вентильная машина и машина постоянного тока с постоянными магнитами, так как они позволяют обеспечивать широкий диапазон частоты вращения маховика и высокую скорость нарастания тока статора. Также с некоторыми ограничениями возможно использование асинхронизированной синхронной машины (машины с двойным питанием). Разработанная система управления маховиковым накопителем, данная система приведена на рис. 1.

И.Ю. Ефремова, асп.; рук. И.З. Глускин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПУСКОВОЙ ОРГАН ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ПО УГЛУ, ВЫЯВЛЕНИЕ МЕСТА И ВЕЛИЧИНЫ НЕБАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ранее был предложен алгоритм адаптивной настройки пускового органа (ПО) противоаварийной автоматики (ПА) по мощности [1]. Исследование эффективности данного алгоритма показало, что его применение способствует повышению пропускной способности сечения энергосистемы. В целях дальнейшего усовершенствования ПО ПА предлагается использовать ПО, фиксирующее перегрузку сечения по углу, а также осуществляющее выявление места и величины небаланса мощности в энергосистеме. Предлагается алгоритм адаптивной настройки ПО ПА по углу с расчетом уставки в режиме реального времени, а также выявлением места и величины небаланса мощности в энергосистеме. Выявление места небаланса осуществляется по следующему принципу: при изменении мощности в узлах i и j изменяются все относительные углы, связанные с узлами i и j , причем имеет место изменение одного из двух знаков. Выявление величины небаланса мощности осуществляется по следующей формуле:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P. \quad (1)$$

Для наглядности исследования поведения системы в координатах «угол — скольжение» было построено фазовое пространство. Исследования эффективности предложенных алгоритмов проводились на примере тестовой энергосистемы в ПК MathCad и ПК ДАКАР. Результаты исследований в двух программных комплексах совпали с высокой точностью и показали следующее: использование алгоритма адаптивной настройки ПО ПА по углу, как и в случае с ПО по мощности позволяет повысить пропускную способность сечения; дополнительно пропускная способность сечения повышается за счет использования более чувствительного ПО по углу, по сравнению с менее чувствительным ПО по мощности; алгоритмы выявления места и величины небаланса мощности позволяют выявить их с высокой точностью, это в дальнейшем позволит реализовывать управляющее воздействие в месте возникновения небаланса, что наиболее эффективно.

Литература

1. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II. М.: Знак, 2011.

*И.С. Запасова, И.В. Ефремова, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В современной электроэнергетике широко используется защитное экранирование. Защитные экраны позволяют значительно уменьшить проникновение или полностью исключить воздействие электромагнитных полей на электротехническое оборудование, кабели, помещения и здания энергетических объектов. Технологически экраны выполняются в виде сплошных и перфорированных листов, сеток, решеток или могут быть нанесены в виде тонкопленочных покрытий.

Для создания экранирующих конструкций наиболее широко применяются металлы, специальные магнитомягкие сплавы и ферриты. Для экранирования также могут применяться другие современные проводящие электрический ток материалы, такие как углеродные волокна, проводящие полимеры. Альтернативными материалами, способными существенно повысить надежность, а также снизить себестоимость за счет упрощения конструкции и технологии изготовления, могут стать наноструктурированные композиционные радиопоглощающие материалы на полимерной основе.

В настоящей работе рассмотрены варианты использования нетрадиционных материалов для защитного экранирования. Исследовано влияние их свойств на изменение степени экранирования. В процессе проведенных расчетов с использованием современной программы ELCUT были построены математические модели и проанализированы распределения электрического поля при различных формах защитного экрана с учетом материала, из которого он изготовлен [1, 2].

Кроме того, были проведены анализ экранирующих свойств современных материалов, в том числе пьезокерамики, и сравнение их свойств со свойствами традиционных экранирующих материалов. На основании проведенных исследований были выявлены достоинства и недостатки материалов и конструкций, которые могут быть использованы для оптимизации процесса создания защитных экранов.

Литература

1. **Козьмина И.С., Чайкин В.С., Матекова Г.Д.** Использование измерений напряженности электрического поля для контроля качества изоляции электрооборудования // Известия КГТУ. Бишкек, 2013. № 30.
2. **Рахимов Д.Р., Швецова Е.В., Козьмина И.С.** Анализ электрического поля для оптимизации бумажно-масляной конденсаторной изоляции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т.3. С. 273.

А.Н. Зыкина, А.Д. Приходько, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВЫРАВНИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ ВВОДОВ

Высоковольтные конденсаторные вводы предназначены для изолирования и механического крепления токоведущих частей, проходящих через стены распределительных устройств, перегородки, крышку и стенки бака трансформатора. Они должны иметь высокую электрическую прочность и обеспечивать пропускание заданного тока. Высоковольтные конденсаторные вводы предназначены для работы при напряжении выше 35 кВ. Для выравнивания поля, снижения максимальной напряженности на конденсаторном вводе и увеличения электрической прочности изоляцию делают слоеной [1]. Традиционно между слоями равной толщины прокладывают тонкие металлические цилиндры различной длины. Выравнивание происходит за счет равенства зарядов на каждом из цилиндров.

В ходе работы была построена модель высоковольтного конденсаторного ввода (токоведущий стержень, охваченный «цилиндрической» формы изоляции, при наличии заземленного фланца) с помощью программы ELCUT [2]. На полученной модели были исследованы места наиболее вероятного электрического пробоя, смоделирован и исследован случай включения концентрически установленных проводящих пластин. Кроме того, был смоделирован и исследован второй способ выравнивания напряженности поля, основанный на использовании слоев диэлектриков небольшой толщины с различными значениями ϵ .

В результате исследований было получено практически полное «гашение» краевого эффекта. Полученные результаты позволяют заметно уменьшить нарушение целостности изоляции, что в свою очередь приводит к увеличению срока службы высоковольтных конденсаторных вводов и уменьшает финансовые затраты на обслуживание.

Литература

1. Козьмина И.С., Чайкин В.С., Матекова Г.Д. Использование измерений напряженности электрического поля для контроля качества изоляции электрооборудования // Известия КГТУ: Бишкек, 2013. № 30.
2. Рахимов Д.Р., Швецова Е.В., Козьмина И.С. Анализ электрического поля для оптимизации бумажно-масляной конденсаторной изоляции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2016, Т.3. С. 273.

*С.Е. Калинин, М.М. Кузьмин, С.Э. Гармашук, студенты;
рук-ли Т.Г. Климова, к.т.н., доц.; Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Одним из наиболее важных процессов происходящих во всей энергосети является измерение электроэнергии в различных ее точках. Это необходимо, в первую очередь для обеспечения защиты всех электроустановок на электрических станциях и подстанциях. Как известно, для проведения измерений используются измерительные трансформаторы тока и напряжения.

В процессе преобразования электрических сигналов могут изменяться как форма сигнала, так и ее содержание. Поэтому важнейшей задачей устройств РЗА для надежного их функционирования является высокоточное измерение нужных параметров электрических сигналов [1].

Кроме метрологических критериев точности и кратности динамического диапазона следует также учитывать массогабаритные показатели, да и сам облик цифровой подстанции. Она может существенно внешне отличаться от известных, быть менее материалоемкой. К тому же в современных структурах РЗА используется многоканальные цепи тока, отдельные измерительные керны для учета специфических свойств каждого канала.

В работе приводятся классификация оптических и электронных ТТ, рассматриваются и сопоставляются технико-экономические факторы и возможные пути расширения их использования.

Литература

1. **Рожнов Е.** Электронные трансформаторы тока и напряжения для полного мониторинга электросетей 0,4—35 кВ // Журнал «ЭнергоРынок». 2014. № 5.

А.А. Калугина, Ю.Г. Чельшева, студенты;
рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТРЕХМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ

Лавинный и стримерный разряд являются формами электрического разряда в воздухе, которые определяют его развитие в воздушных изоляционных промежутках оборудования высокого напряжения, в высоковольтных электротехнологических установках и т.п. Поэтому электронные лавины и стримеры являются классическими объектами исследования специалистов в области техники и электрофизики высоких напряжений.

В этой связи их изучение предусмотрено в дисциплинах профилей подготовки бакалавров «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника» и «Техника и электрофизика высоких напряжений», а также программой подготовки магистров «Техника и электрофизика высоких напряжений» направления «Электроэнергетика и электротехника». Например, программы дисциплин «Электрофизические основы техники высоких напряжений» подготовки бакалавров и «Физика электрического разряда» подготовки магистров предполагают практические занятия и расчетные задания, предусматривающие расчет и анализ параметров электронных лавин и стримеров, развивающихся в воздухе в сильных электрических полях.

На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» разработаны программы, реализующие реалистичную трехмерную математическую модель лавинного и стримерного разряда в воздухе [1]. Она учитывает ударную ионизацию газа электронами, их дрейф в электрическом поле, прилипание и отлипание, рекомбинацию, фотоионизацию газа излучением разряда. Программы описывают формирование лавины, лавинно-стримерный переход, развитие одиночного стримера, одновременное распространение нескольких стримеров, их ветвление. Они исполняются на персональном компьютере под управлением 32- или 64-разрядных операционных систем Windows 7/8/10 и используют многопоточные вычисления. В совокупности с применением экономичных численных методов это обеспечивает высокую скорость расчетов, которая позволяет успешно использовать их в учебном процессе в рамках названных дисциплин, а также при подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров.

Литература

1. Белогловский А.А. Верещагин И.П. Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // Электричество. 2011. № 11.

*П.А. Колпакова, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;
Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ДЕФЕКТА В ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Измерение частичных разрядов (ЧР) – важнейший этап контроля состояния изоляции высоковольтного электрооборудования [1]. Интенсивность ЧР определяют как на заводах в рамках приемо-сдаточных испытаний, так и в эксплуатации. В последние годы развитие микропроцессорной и компьютерной техники расширило возможности регистрации и анализа характеристик ЧР. В частности, появилась возможность отображения характеристик ЧР на амплитудно-фазовых диаграммах (АФД), образцы которых несут информацию о характере дефекта в изоляции электрооборудования. В маслонаполненных измерительных трансформаторах высокого напряжения такими дефектами могут быть [2]: диэлектрические и проводящие частицы в масле, газовые включения, эмульгированная влага и др. Развитие физических основ и математических методов интерпретации АФД представляет собой актуальную задачу, так как позволяет упростить принятие решений и оптимизировать процедуру устранения дефектов на заводе и в эксплуатации.

В докладе представлены результаты осциллографирования сигналов ЧР, полученных в ходе приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) маслонаполненных измерительных трансформаторов 35-220 кВ на испытательной станции Раменского электротехнического завода «Энергия». Для регистрации ЧР применялся индуктивный датчик, сигналы с которого калибровались с помощью градуировочного генератора, входящего в комплект прибора ИЧР-201 производства компании «ТЕСТСЕТ». Для обработки осциллограмм в среде MatLab был написан программный код, отделяющий сигналы ЧР от помех и идентифицирующий коронный разряд в случае его возникновения при испытаниях. Для фильтрации помех применялись частотный анализ и вейвлет-преобразования, что позволило получить однозначно интерпретируемые АФД. В докладе приведены образцы АФД, характерные для типовых дефектов в измерительных трансформаторах, выявляемых на стадии ПСИ.

Литература

1. **ГОСТ Р 55191—2012.** Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов.
2. **Вдовико В.П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования Новосибирск: Наука, 2007.

М.И. Костяев, студ.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАНА ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОДЕРНИЗАЦИИ ВОЛЖСКОЙ ГЭС

За последние 20 лет в России значительно возросла доля энергетического оборудования, в том числе оборудования гидроэлектростанций, функционирующего за пределами нормативного срока эксплуатации. Большинство ГЭС было введено в эксплуатацию в начале второй половины XX века и в настоящее время нуждается в модернизации и замене оборудования. Экономические трудности 1990-х годов не позволили провести своевременную замену морально и физически устаревшего оборудования, вынуждая ограничиваться только лишь плановыми ремонтами и заменой отдельных узлов.

Компанией ПАО «РусГидро» была инициирована программа технического перевооружения и реконструкции ряда станций, к 2011 году была разработана и одобрена программа комплексной модернизации генерирующих объектов ПАО «РусГидро» (далее – ПКМ), рассчитанная на период до 2025 года. ПКМ предполагает полную замену оборудования, выработавшего нормативный срок эксплуатации, особенностью программы является ориентация на комплексную модернизацию генерирующих объектов, а не на точечную замену отдельных узлов и агрегатов, как это производилось ранее [1, 2].

Объект исследования – Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС. Станция введена в эксплуатацию более 50 лет назад. За время работы станции ее оборудование значительно устарело, в связи с чем в рамках ПКМ планируется его постепенная замена и реконструкция. Модернизации подлежат как гидросиловое оборудование, так и электрическая часть [3].

При модернизации необходимо применить проектный подход, что позволит сфокусироваться на реализации выбранной стратегии, достижении поставленных целей в установленные сроки.

Предлагается провести исследование влияния плана производства работ по замене оборудования для получения оптимальных экономических показателей данного проекта, таких как чистый дисконтированный доход, индекс доходности и другие показатели, отражающие интересы участников проекта.

Литература

1. **Управление проектами** / Под ред. **Шапиро В.Д.** и др. – СПб.: ДваТрИ, 1996
2. **Волжская ГЭС** [Электронный ресурс] / ПАО «РусГидро» – Электрон. текстовые дан. – Волжск: [б.и.], 2015. – Режим доступа: [http:// volges.rushydro.ru](http://volges.rushydro.ru)
3. **Гидроэнергетика** и комплексное использование водных ресурсов СССР / под. ред. П.С. Непорожного. М.: Энергоиздат, 1973. 560 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В электрических сетях наличие нелинейных индуктивных и емкостных элементов при переключениях (плановые переключения, работа дифференциальной защиты шин и др.) может приводить к образованию феррорезонансных контуров [1]. В электрической цепи ферромагнитными (индуктивными) элементами могут являться силовые трансформаторы, трансформаторы напряжения и тока, шунтирующие реакторы, линейные вольтодобавочные трансформаторы и другие аппараты с массивной обмоткой и стальным сердечником. Емкость в сети представлена разветвленными высоковольтными линиями электропередач, конденсаторами, шунтирующими контактные разрывы высоковольтных выключателей, ошиновкой подстанций [2].

В данной работе рассматривается влияние параметров цепи (емкостей оборудования относительно земли, емкостей конденсаторов, шунтирующих разрывы выключателей и ВАХ ТН) на возникновение феррорезонансных процессов при коммутации высоковольтных выключателей. Составлена схема замещения для исследования ТН на феррорезонанс. Моделирование осуществляется с помощью программного комплекса EMTP-RV. Производится построение областей опасного феррорезонанса. Строится эквивалентная трехфазная схема замещения распределительного устройства и исследуется в различных режимах работы. Оценка достоверности производится путем сопоставления полученных данных с данными моделирования в апробированной программе FERES, данными моделирования в расширении Simulink программной среды MatLab, экспериментальными данными, данными из эксплуатационной практики и анализа аварий, происходивших в сетях. Даются рекомендации по предотвращению феррорезонансных процессов в сети.

Литература

1. **Алексеев, В.Г., Евдокимов С.А.** Условия феррорезонанса с трансформаторами напряжения в сети 220 кВ // Электрические станции. 1994. № 10.
2. **Поляков В.С.** Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными ТН // Энергоэксперт. 2014. № 1.

М.М. Кузьмин, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

В современной энергетике очень быстро происходит введение различных технологий измерения, средств защиты и различных автоматических устройств [1]. Каждый день разрабатываются совершенно новые методы, алгоритмы РЗ и измерения, и для того чтобы воплотить эти идеи в жизнь требуются специальные ресурсы, помогающие протестировать правильность работы алгоритмов и их точность. Такими ресурсами являются специальные программные обеспечения такие как, MatLab, PsCad, RsCad, PSAT и другие. Но в силу того что разные программные обеспечения используют разные подходы к вычислению математических задач и их обработки, разработчики новых алгоритмов могут столкнуться с тем, что в разных программных средах могут различаться показания или решения тех или иных задач. Поэтому в данной работе ставится задача провести обзор существующих программных алгоритмов измерительных преобразователей действующего значения тока и напряжения, а именно проанализировать возможные погрешности основных программных обеспечений и выяснить при каких условиях те или иные программные средства работают точнее. На основе полученных результатов приводятся обоснования по модернизации существующих алгоритмов измерения.

Литература

1. Лаппе Р., Фишер Ф. Измерения в энергетической электронике. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Н.В. Лебедева, студ.; рук-ли В.А. Шуин, д.т.н., проф.;
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящее время активно ведутся разработки по созданию нетрадиционных измерительных преобразователей тока и напряжения. Исследования показывают перспективность применения маломощных делителей напряжения по причине того, что с применением микропроцессорной элементной базы в обработке и передаче информации отпала необходимость в мощных измерительных преобразователях. Однако разрабатываемые делители напряжения требуют проведения исследований.

Исследование частотных характеристик выполнялось для резистивного делителя напряжения кл. 110 кВ [1]. Испытательное напряжение, изменяемое в заданном частотном диапазоне, формировалось с помощью комплекса Omicron СМС 356 с и повышающим трансформатором. Результаты измерений обрабатывались в программном комплексе MatLab. Получены частотные характеристики делителей напряжения (рис. 1 и 2).

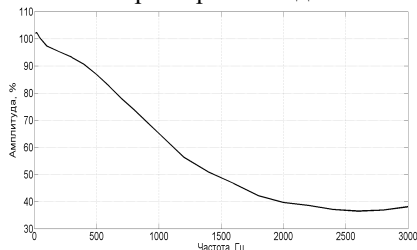


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика экспериментального образца

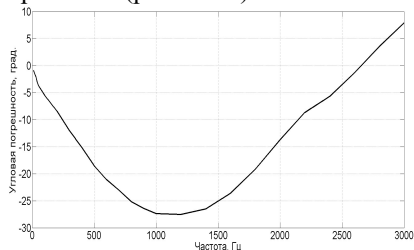


Рис. 2. Фазочастотная характеристика экспериментального образца

Обнаруженные закономерности поведения в частотной области измерительных преобразователей напряжения на основе резистивных делителей позволили разработать методы компенсации их погрешностей. Также для целей релейной защиты практический интерес представляют измерительные резистивные преобразователи напряжения 6(10) кВ. В докладе представлены результаты исследований характеристик данных преобразователей.

Литература

1. **Lebedev V.D., Yablokov A.A.** Research of the metrological characteristics and voltage transformer with open core antiresonance properties // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland, 2015. № 698. P. 160—167.

*Д.С. Лукьянцев, П.С. Анциферов, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТА САМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КУРСЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

В настоящее время моделирование получило широкое распространение при проведении научных исследований, проектировании, в сфере образования. Часто в процессе изучения теории электромагнитного поля используют моделирование на проводящей бумаге, основанное на аналогии исследуемых полей и электрического поля в проводящей среде. В работе использована проводящая бумага для моделирования плоскопараллельных и осесимметричных полей в кусочно-однородных средах, описываемых уравнениями Лапласа [1].

Кроме того, в настоящее время востребованным и распространенным является математическое моделирование. Вычислительные эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на современные вычислительные инструменты, в нашей работе на программу ELCUT, более глубоко и подробно их изучить. Разработана и апробирована методика индивидуального интерактивного подхода при изучении раздела электростатики в теории электромагнитного поля в курсе ТОЭ, которая стимулирует студента к активизации самообразования. В процессе выполнения рабочего задания студент должен самостоятельно рассчитать и исследовать одну и ту же задачу в которой: аналитический расчет применяется к выполнению задания по типовому расчету, физическое моделирование используется при выполнении лабораторной работы, соответствующей заданию типового расчета, а математическое моделирование используется при выполнении типового расчета с помощью программы ELCUT. В процессе выполнения работы подобраны параметры исследуемых задач, которые удовлетворяют аналитическим расчетам и физическому моделированию в лаборатории ТОЭ.

Возможность одновременно проводить физическое, математическое моделирование и аналитический расчет позволяет лучше разобраться и усвоить изучаемый материал, развивает навыки самообразования, которые стимулируют углубленное изучение теории электромагнитного поля.

Литература

1. **Педро И.И., Машковцева М.Н., Козьмина И.С.** Использование моделирования на проводящей бумаге для исследования электростатических полей при определении качества изоляции // Радиотехника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXII междуна. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2016, Т.3. С. 287.

Э. Лхамсүрэн, асп.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНОЛОГИЯ «ENERGY.NET» ПОИСКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ С НАЛОЖЕННЫМ ТОКОМ В СЕТЯХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 10 кВ

Возможности технологии «Energy.Net» позволяют совершенствовать методы и средства управления в различных режимах работы многообразных элементов ЕЭС России. Одной из актуальной задачей является проблема совершенствования технологии определения места повреждения (ОМП) в сети воздушных линии (ВЛ) 10кВ с изолированной нейтралью в ЭЭС Монголии, России и других стран. Освещается вопрос широкого использования токовых указателей типов Поиск, Волна, Квант в режиме замыкания на землю (ЗНЗ).

Область применения этих указателей ограничена и они неэффективны при следующих условиях:

- при небольшой суммарной длине ВЛ-10кВ
- при ЗНЗ в середине одиночной ВЛ-10кВ
- при ЗНЗ в ближней зоне при наличии двух ВЛ-10кВ и т.п.

Целью настоящей работы является описание характеристики разработанной НИУ «МЭИ» технологии снятия ограничений на область применения токовых указателей при поиске места ЗНЗ в рабочем режиме сети ВЛ-10кВ с изолированной нейтралью.

Особенностью рассматриваемого оборудования для ОМП является использование так называемого «пассивного передатчика» в виде серии импульсного перевода возникающего ЗНЗ в режим $K_{дв}^{(1,1)}$.

Соотношение электрических величин при этом были исследованы авторами на физической модели ZOL-III при более чем 200 вариантах исходных данных. Полученные данные подтверждают работоспособность предложенной технологии «Energy.Net» топографического ОМП.

В данной технологии конструкция ВЛ-10кВ является не только элементом передачи электроэнергии, но и своеобразной средой распространения сетевого информационного импульсного сигнала, что соответствует замыслу «Energy.Net»

На физической модели определены рекомендуемые технические параметры высоковольтного оборудования (10кВ, 10А, 0.5Гц/50Гц, R = 1 кОм), при котором обеспечивается термоустойчивость токоограничивающего резистора (1 кОм, 1 кВт).

Литература

1. Арцишевский Я.Л. Лхамсүрэн Э. Высоковольтное оборудование для активного поиска замыкания на землю в сетях ВЛ-10кВ // Материалы XII междунар. конф. ТРАВЭК, Москва, 18—19 ноября 2015 г. С. 32—33.

*Р.С. Максимов, А.Д. Клыков, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В современном мире энергетики и электротехники важную роль играет изоляция (материалы с диэлектрическими свойствами) в электроэнергетических изделиях и устройствах, таких как конденсаторы, кабели, трансформаторы. В настоящее время в качестве электрической изоляции и защитной оболочки проводов и кабелей разных марок применяют три класса полимеров: традиционные резины, классические термопласты и термопластичные эластомеры.

Старение изолирующих материалов в электрическом поле связано с износом, который определяется изменением диэлектрических свойств, связанных с воздействием частичных разрядов. На механизмы пробоя диэлектриков существенное влияние оказывает неоднородность их структуры, обусловленная природой исходного сырья, наличием посторонних включений и загрязнений, несовершенством процессов технологической обработки[1]. Можно утверждать, что диэлектрики, имеющие неоднородности в своей структуре: поры, микротрещины, инородные включения, встречаются в электротехнике гораздо чаще, нежели материалы с однородной структурой. Широта промышленного использования диэлектриков позволяет определить задачу исследования — проанализировать механизмы пробоя твердых диэлектриков и влияние неоднородности структуры и размера пор диэлектрика на его прочность.

С помощью современной программы ELCUT были созданы модели для исследования диэлектриков с различными посторонними включениями на примере кабельных линий. В ходе работы были учтены не только реальные значения диэлектрической проницаемости полимерной изоляции, но и наличие посторонних включений, а также принималась в расчет концентрация, структура и размеры пор. По распределению напряженности электрического поля можно судить о качестве изоляции, как в начале эксплуатации, так и в ее процессе. В процессе работы были определены оптимальные формы и размеры внутренних пор диэлектриков при разных значениях диэлектрической проницаемости изоляции модели, учитывая всевозможные в нее включения, и при различных классах напряжений для оценки срока службы изоляции.

Литература

1. Козьмина И.С., Чайкин В.С., Матекова Г.Д. Использование измерений напряженности электрического поля для контроля качества изоляции электрооборудования // Известия КГТУ. Бишкек, 2013. № 30.

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ NATIONAL INSTRUMENTS ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ПРОТОКОЛУ МЭК 61850

Строительство сетей SmartGrid является одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики. Построение «цифровых» подстанций, является частью данного проекта и требует решения следующих задач: обеспечение энергоэффективного, надежного и экономичного функционирования энергосистемы.

«Цифровая» подстанция строится на основе интегрированных цифровых систем измерения, защиты и управления с применением цифровых трансформаторов тока и напряжения и цифровых схем управления [1].

Для экономичного и энергоэффективного использования цифрового измерительного трансформатора требуется выбор наиболее оптимального программно-технического обеспечения и построение на его основе системы коммуникаций, для передачи цифровой информации между элементами подстанции.

Система должна обеспечивать обмен технологическими и сервисными данными, высокую надежность, минимальное время обработки информации в пределах заданного класса точности, соответствие стандартам и функциональную совместимость оборудования различных производителей.

Для реализации процесса передачи и использования цифровых данных был использован анализатор NI SmartGrid. Данная технология осуществляет мониторинг и анализ качества электроэнергии и релейной защиты на основе многофункциональной встраиваемой системы сбора данных и управления на основе CompactRIO [2]. Анализатор NI SmartGrid включает контроллер NI(cRIO)-9704 и модули ввода-вывода NI-9223. Коммуникация устройства с компьютером осуществляется посредством ПО LabVIEW.

В докладе будут представлены результаты исследования применения технологии National Instruments для организации передачи цифровых данных по протоколу МЭК 61850-9.2LE.

Литература

1. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем.// Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 35—42.
2. **Технологии** National Instruments для организации активно-адаптивных сетей. 20 с.

*Д.В. Михеев, асп.; А.А. Наумова, О.И. Кольцун, студенты;
рук-ли П.А. Бутырин, д.т.н., чл.-корр. РАН; Г.Г. Гусев, д.т.н., проф.;
Ф.Н. Шакирзянов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ТРАНСФОРМАТОРЫ НА ОСНОВЕ КАТКОНОВ

Каткон, рассмотренный в [1], является новым пассивным элементом электрической цепи, который реализуется как двухзаходная намотка катушки в виде сложенных вместе изолированных друг от друга проводов из ферромагнитной фольги, расположенных на магнитном или немагнитном сердечнике. В таком исполнении двухзаходная катушка представляет собой индуктивную катушку с самокомпенсацией реактивной мощности. Таким образом, одно техническое устройство сочетает в своей структуре функции индуктивной катушки и конденсатора, поэтому каткон обладает высоким потенциалом многофункционального применения, в частности, в качестве фильтрокомпенсирующего устройства [1].

Катконы могут быть использованы и в других электротехнических устройствах, например в трансформаторах. Действительно, два каткона, намотанные на общий сердечник, то есть катконы с индуктивной связью, представляют собой трансформатор. При этом первичный и вторичный контуры трансформатора на катконах могут быть связаны и иными способами: связь первичного и вторичного контуров может быть индуктивной, емкостной, гальванической, комбинированной. Первичный и вторичный контуры могут иметь одинаковые и разные резонансные частоты. Поэтому в таких трансформаторах может быть реализовано несколько резонансных режимов, а именно: резонанс в первичном контуре; резонанс во вторичном контуре; полный (общий) резонанс первичного и вторичного контуров; оптимальный резонанс, который достигается подбором коэффициента связи при полном резонансе.

В работе авторами были предложены макромодели трансформаторов на основе катконов с идентичными параметрами и различными видами связи, исследованы частотные и нагрузочные характеристики двух индуктивно связанных катконов в режиме полного резонанса.

Практическая реализация таких трансформаторов позволит повысить коэффициент мощности и КПД, а разработка макромоделей трансформаторов на базе катконов с сильной и слабой магнитной и емкостной связями делает возможным также реализацию поличастотных пассивных ФКУ.

Литература

1. **Математическая** модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман и др. // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 79—84.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СЕТИ 500 кВ

В новых экономико-политических условиях актуальной проблемой является энергетическая безопасность России. Одной из причин аварий в электрических сетях являются различного рода перенапряжения. В данной работе рассматриваются перенапряжения, связанные с феррорезонансными процессами.

В сетях 500 кВ основной причиной феррорезонанса являются коммутации холостых ошинок. Емкость конденсаторов, шунтирующих разрывы выключателей, совместно с емкостью ошиновки и подключенного к ней оборудования на землю образуют феррорезонансный контур [1].

На ПС 500 кВ обычно количество присоединений невелико, кроме того, ОРУ-500 часто проектируются по схемам 3/2 или 4/3. Схема ОРУ-500, выполненная по схеме 3/2, приведена на рис. 1, а. Расчетная схема для исследования процессов при отключении холостой ошиновки приведена на рис. 1, б [1].

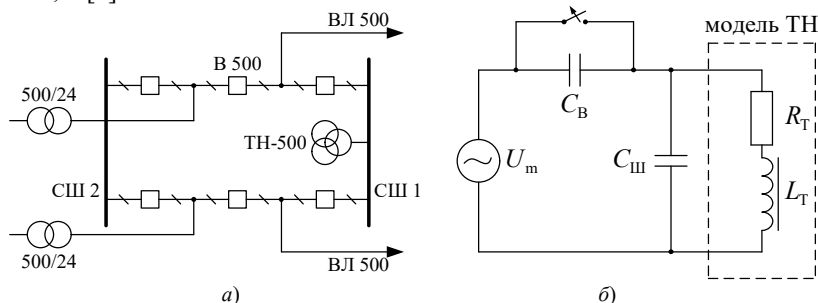


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции 500 кВ (а) и расчетная схема для моделирования коммутации холостой ошиновки (б)

Для определения возможности возникновения феррорезонанса рассчитываются параметры всех элементов схемы замещения рис. 1, б: суммарные емкости выключателей, системы шин и характеристика намагничивания трансформатора напряжения [2].

Приближенная модель для исследований воссоздана с помощью программного комплекса MatLab в пакете расширений Simulink.

Литература

1. СТО 56947007-29.240.10.191-2014. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6 – 750 кВ.
2. Макаров, А.В. Об эффективности функционирования антиферрорезонансных трансформаторов напряжения // Энергоэксперт. 2013. № 6.

*Д.О. Набиулина, студ.; рук-ли С.В. Белоусов, к.т.н., доц.;
В.Н. Винокуров, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЯХ

В соответствии с энергетической стратегией России на период до 2030 года на территории страны планируется модернизация и ввод новых генерирующих мощностей, что подразумевает подготовку и реализацию проектов строительства электроэнергетических объектов. Такие проекты являются капиталоемкими, стратегически важными и технологически сложными, и по этим причинам риски невыполнения проектов в срок или несоблюдения конечных параметров обязаны быть контролируруемыми. Для достижения указанных целей актуальным является применение методов управления проектной деятельностью для энергетической отрасли.

Информация о выполненных проектах показывает, что около половины крупных проектов задерживают сроки пуска в эксплуатацию или объект не обеспечивает требуемые рабочие параметры. Такого рода проблемы связаны с неэффективным планированием, контролем и управлением процессами, что ставит под угрозу обеспечение прогнозируемых масштабов генерации.

Чтобы предотвратить или минимизировать убытки, связанные с рисками, необходимо своевременно определять потенциальные проблемные области и принимать меры по минимизации рисков или их устранению [1,2].

Предлагаются к рассмотрению следующие мероприятия: формирование графиков управления проектом в целом с включением в них административной деятельности с промежуточными показателями контроля; совершенствование принципов формирования проектной команды, определение недостающих компетенций и своевременное их развитие внутри электроэнергетических компаний; оптимизация организации проектной деятельности с целью оперативной и гибкой управляемости проектами на всех уровнях компании.

Анализ проблем управления проектной деятельностью, а также предлагаемые меры для их ликвидации по результатам проведенных исследований, могут помочь избежать значительных затруднений при реализации проектов строительства в электроэнергетике.

Литература

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
2. **Осика Л.К.** Инжиниринг объектов интеллектуальной энергетической системы. Проектирование. Строительство. Бизнес и управление. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

*Е.В. Нечаев, студ.; А.А. Яблоков, к.т.н., м.н.с.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время сетевые компании все активнее внедряют цифровые технологии с целью управления электроэнергетическими сетями и мониторинга их работы. В связи с этим ведутся разработки по созданию комбинированных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения, устройств контроля параметров гололедообразования, температуры, натяжения проводов и др. Все перечисленные электронные устройства нуждаются в организации питания, поэтому актуальной проблемой является разработка универсального метода организации питания для современной микропроцессорной аппаратуры и электронных устройств, устанавливаемых на открытых распределительных устройствах электроэнергетической сети.

Существует несколько способов организации питания, такие как лазерная накачка, использование солнечных панелей и др. Лазерная накачка является дорогостоящей и сложной в эксплуатации, а солнечные панели подвержены загрязнению, обледенению, деградации фотоэлементов и их применение возможно не во всех регионах страны. С точки зрения авторов, перспективным является метод, основанный на отборе мощности с фазного провода линии электропередачи.

Разработка экспериментального образца электронного блока питания включала в себя следующие этапы:

- 1) проведение исследований магнитопроводов разных типов сталей;
- 2) создание математической модели устройства на основе полученных экспериментальных данных в виде основной и средней кривых намагничивания по каждому из рассмотренных типов стали;
- 3) сравнение результатов расчета математической модели с экспериментальными данными с целью верификации модели;
- 4) разработка принципиальной схемы электронного блока питания;
- 5) изготовление аналогового и электронного элементов устройства, проведение испытаний экспериментального образца.

В докладе будут рассмотрены результаты, полученные при выполнении указанных выше этапов.

А.А. Ооржак, студ.; рук. М.А. Кошелев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ НА НАЛИЧИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Эффективным методом оценки состояния высоковольтной изоляции электрооборудования является электрический метод измерения частичных разрядов. Согласно [1] для определения интенсивности частичных разрядов рекомендуется проводить измерения в специально созданном измерительном контуре по широкополосной схеме с использованием активного импеданса в диапазоне частот 100-500 кГц. Однако в некоторых случаях, которые имеют большое практическое значение, не представляется возможным провести измерения частичных разрядов с использованием активного импеданса, поэтому возникает необходимость применения высокочастотных трансформаторов тока.

Проведен расчет высокочастотного трансформатора тока [2] для измерения частичных разрядов в указанном выше диапазоне частот. В соответствии с результатами расчета изготовлен высокочастотный трансформатор тока для регистрации частичных разрядов в лабораторных условиях. Измерена амплитудно-частотная характеристика высокочастотного трансформатора тока. За счет подбора материала сердечника, числа витков и сопротивления нагрузки получена практически горизонтальная амплитудно-частотная характеристика в диапазоне частот 100-500 кГц.

В лабораторных условиях кафедры ТЭВН проведены измерения частичных разрядов с использованием высокочастотного трансформатора тока в диапазоне частот 100-500 кГц для дефектного высоковольтного ввода и различных электродных систем. Определена интенсивность частичных разрядов.

В лабораторных условиях также были проведены измерения частичных разрядов с использованием активного импеданса в диапазоне частот до 250 МГц. Определены параметры импульсов частичных разрядов, рассчитаны спектры импульсов частичных разрядов.

Даны рекомендации по контролю изоляции на наличие частичных разрядов.

Литература

1. **ГОСТ Р 55191—2012.** Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов, М.: Стандартинформ, 2014.
2. **Бэрк Г.Ю.** Справочное пособие по магнитным явлениям. М.: Энергоатомиздат, 1991.

*Д. Р. Рахимов, В.А. Кадах, И.А. Морсин, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАГОРОДНЫХ СТРОЕНИЙ

Согласно статистике, в России в среднем интенсивность грозовой активности составляет 5-7 ударов на квадратный километр земной поверхности в год. Импульсные перенапряжения от удара молний являются причиной повышенной опасности для жизни человека, выхода из строя различного оборудования, поэтому решению вопросов молниезащиты уделяется огромное значение и ведется постоянная разработка новых способов защиты индивидуальных загородных строений.

В работе рассмотрены такие способы молниезащиты, как установка одиночного стержневого молниеприемника, соединенного токоотводом с заземлителем, установка на стойках вдоль конька крыши тросового молниеприемника, также соединенного одним или несколькими токоотводами с заземлителями, и создание по периметру крыши, включая ее конек, молниезащитной сетки — «сетки Фарадея», — соединенной одним или несколькими токоотводами с заземлителями.

С помощью программы Elcut было проанализировано распределение электрического поля моделей вышеперечисленных средств защиты. На моделях показаны неоднородности электрического поля, место появления встречного лидера, а так же смоделировано поле в момент протекания токов молнии по устройствам рассматриваемых молниезащит [1, 2].

Анализ рассмотренных способов молниезащиты позволил сделать выводы о положительных и отрицательных свойствах исследованных средств защиты индивидуальных загородных строений. «Сетка Фарадея» это сравнительное дорогое устройство, из-за большого количества металлоконструкций, но поле внутри сетки практически отсутствует. У уложенной на крыше молниезащитной сетки активно будут работать только ее верхние проводники, размещенные ближе к коньку, поэтому варианты со стержневым или тросовым молниеотводами, смонтированными над коньком кровли являются хоть и менее эффективными с точки зрения защиты, но наиболее оптимальными и выгодными с экономической стороны.

Литература

1. **Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С.** Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.

А.П. Решетников, студ.; рук-ли М.Г. Тягунов, д.т.н., проф.;
В.Н. Винокуров, асс. (НИУ «МЭИ»)

ОБЗОР УЧАСТНИКОВ РЫНКА СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ИХ ВЫЗОВЫ

Отвечая глобальной тенденция с 2013 года в России на законодательном уровне существует стимулирование использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности [1].

Солнечная энергетика является сложившимся и развивающимся направлением возобновляемой энергетики в мире. Однако, Россия, несмотря на доступность больших площадей с достаточным уровнем солнечной инсоляции и наличие более 65 % территорий, не охваченных единой энергетической сетью [2], еще находится в начале развития данного направления. Государственная поддержка проектов солнечной энергетики доступна только объектам с достаточным уровнем локализации оборудования и конкурентными удельными капитальными затратами. Для выполнения данных условий необходимо создание новых или переоборудование существующих промышленных предприятий для производства оборудования для объектов солнечной энергетики на территории России.

Состояние и интересы участников рынка солнечной энергетики в России требует комплексного рассмотрения для выявления острых потребностей и актуальных направлений развития [3].

Исследование заключается в определении всех возможных заинтересованных сторон рынка солнечной энергетики в России. Использованные методы исследования: обзор доступных источников, анкетирование, личные встречи. Это даст информацию, которая необходима для структурирования проектов по производству оборудования для достижения требуемого уровня локализации и снижения капитальных затрат в проектах солнечной энергетике.

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 28.05.2013 N 449 (ред. от 17.02.2014) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

2. **Безруких П.П., Грибкова С.В.** // Сборник трудов. XIII Международная ежегодная конференция «Возобновляемая и малая энергетика 2016», посвященная 150-летию основания Русского технического общества (РТО). М.: Комитет ВЭИ РосС-НИО, 2016.

3. **Постановление** Правительства РФ от 23 января 2015 г. № 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии».

*Е.И. Рогозинников, студ.; рук-ли Е.А. Волошин, асс.;
А.А. Волошин, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И ВИЭ

Изолированные распределительные сети сталкиваются с проблемами интеграции в общую систему электроснабжения устройств ВИЭ, проблемами ценообразования и взаиморасчетов между производителями и потребителями ЭЭ. Для решения описанных проблем предлагается организация распределенной интеллектуальной системы электроснабжения.

Узлами такой системы являются персональные энергоблоки. Персональный энергоблок, состоящий из накопителя электроэнергии, зарядно-подзарядного устройства, инвертора, блоков ввода-вывода ЭЭ и интеллектуального блока управления — это энергоинформационное устройство потребителя электроэнергии, в котором осуществляется накопление электроэнергии, к которому подключаются ВИЭ, а также другие персональные энергоблоки. Между энергоблоками прокладываются электрические линии связи для передачи электроэнергии и цифровые линии связи для функционирования системы управления.

Поскольку передача электроэнергии между персональными энергоблоками осуществляется по принципу «точка-точка» (P2P), осуществление расчетов и ценообразование также проводится в рамках небольших локальных рынков электроэнергии. Саморегулирование системы достигается путем применения мультиагентной системы (МАС) управления взаиморасчетами между узлами. В такой системе каждый узел является агентом МАС, осуществляющим свою деятельность для достижения целей свойственных своему типу агентов: агенты потребителей стремятся обеспечить бесперебойное электроснабжение в соответствии с графиком нагрузки по наименьшей цене, агенты производители ЭЭ стремятся произвести и реализовать на локальном рынке как можно больше энергии по наибольшей цене [1]. Рыночные механизмы торгов между агентами позволяют сбалансировать спрос и предложение ЭЭ при ее равновесной цене в автоматическом режиме [2].

Литература

1. **Волошин А.А., Жуков А.В., Архипов И.Л.** Применение мультиагентных систем в электроэнергетике за рубежом и в России. // Вести в электроэнергетике. 2016. № 2, № 3, № 4.

2. **Рассел С. Норвиг П.** Искусственный интеллект. Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.

Л.В. Сидорова, студ.; рук-ли В.А. Шуин, д.т.н., проф.;
О.А. Добрягина, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

В кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в качестве защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) как правило применяются токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Основным расчетным условием для выбора тока срабатывания $I_{0\text{ с.з}}$ ТЗНП является условие отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения при дуговом ОЗЗ [1]:

$$I_{0\text{ с.з}} \geq K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} I_{C\text{ собс}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$ – коэффициент отстройки; $I_{C\text{ собс}}$ – собственный емкостный ток ОЗЗ защищаемого присоединения; $K_{\text{бр}} = 2\text{--}5$ – коэффициент, учитывающий увеличение значения тока в неповрежденном присоединении в переходных режимах при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ).

Для ТЗНП на основе электромеханических реле тока (например, РТ-40) рекомендуется принимать максимальные $K_{\text{бр}} = 4\text{--}5$, для ТЗНП с использованием статических реле тока – $K_{\text{бр}} = 2\text{--}3$, при том каких-либо обоснованной рекомендуемых значений $K_{\text{бр}}$ в известных источниках не приводится.

Большие значения коэффициента $K_{\text{бр}}$ приводят к увеличению тока срабатывания ТЗНП и ограничивают область применения простой и надежной защиты присоединениями с небольшими $I_{C\text{ собс}}$. В [1] на основе экспериментальных исследований динамических режимов функционирования ТЗНП показано, что для защит с электромеханическими реле тока $K_{\text{бр}}$ можно уменьшить до 1,5–2,5. Аналогичные исследования для ТЗНП со статическими реле тока например РСТ11–РСТ14, выпускаемых ЧЭАЗ, не проводились.

Цель работы — исследования динамических режимов работы ТЗНП с использованием реле тока серии РСТ на математических имитационных моделях, выполненных в системе моделирования Matlab. Исследования на имитационных моделях показали, что $K_{\text{бр}}$ в (1) для исполнений ТЗНП на основе статических реле тока серии РСТ с учетом особенностей принципиальной схемы можно уменьшить до значений порядка 1. Достоверность полученных результатов планируется проверить экспериментально с использованием метода физико-математического моделирования.

Литература

1. Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. 2010. № 2 (62). С. 36–40.

*К.А. Смагин, асп.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;
И.П. Верещагин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

УЧЕТ ВТОРИЧНОГО УНОСА ПРИ РАСЧЕТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Существовавшие до последних лет методы расчета степени очистки дымовых газов в электрофильтрах в основном учитывали прямое осаждение поступающих на вход частиц золы. Только в последние годы были предприняты попытки учесть вторичные процессы. Однако используемые физико-математические модели этих процессов недостаточно обоснованы.

Авторами разработана обобщенная модель процессов, в которой в равной степени учитываются как процессы прямого осаждения, так и вторичного уноса возвращенной пыли. Модель характеризуется тремя интегральными параметрами — коэффициентами прямого осаждения K_{oc1} и осаждения возвращенных в промежутки частиц K_{oc2} , а также коэффициентом возврата K_v , который представляет собой долю возвращенных в промежутки частиц по отношению к потоку осаждения.

Коэффициент прямого осаждения рассчитывается по разработанной авторами методике [1]. Коэффициент вторичного осаждения также рассчитывается по методике, изложенной в [1]. Однако должны быть учтены особенности процесса вторичного осаждения. Наибольшие проблемы возникают при определении коэффициента возврата K_v . Для этого предлагается использовать результаты периодических испытаний промышленных электрофильтров.

Предложена модель процессов в электрофильтре, которая основана на балансе материальных потоков для каждого элемента длины электрофильтра. Она отражает связь между процессами на предыдущем и рассматриваемом элементах длины. Сопоставление с экспериментальными распределениями свидетельствует о том, что модель правильно отражает общий характер распределений. Однако для численного совпадения необходимы уточнения коэффициентов K_{oc2} и K_v .

В этом плане важную роль играет модель роста слоя и определение функциональных связей с потоком частиц в бункер и проскоком. В дальнейшем планируется разработка такой модели.

Литература

1. Верещагин И.П., Смагин К.А., Тимофеев Е.М. Совершенствование метода расчета процессов в электрофильтрах для очистки дымовых газов ТЭС от золы. // Электричество. 2015. № 6.

*Р.Э. Теряев, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;
Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНО-ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

На сегодняшний день для обеспечения надежной работы высоковольтных делителей напряжения их необходимо конструировать на основе дорогой элементной базы, способной долгое время без разрушения находиться в изоляционной среде, обеспечивающей электрическую прочность, отвод тепла и отсутствие коронного разряда на внутренних элементах конструкции. По этой причине делители высокого напряжения имеют большую стоимость.

В настоящем докладе приведен опыт разработки высоковольтного емкостно-омического делителя из массово выпускаемых и недорогих компонентов. Основной изоляционной средой для рассматриваемого делителя является атмосферный воздух. Была поставлена задача поиска конструктивных решений, обеспечивающих максимально возможное рабочее напряжение для такой конструкции.

На основе схем замещения элементов делителя [1] с учетом наличия паразитных емкостей на землю была разработана расчетная модель в среде визуального моделирования установившихся и переходных процессов в электрических цепях SimPowerSystems. Паразитные емкости определялись с помощью программы двумерного численного моделирования электрических полей BETAFields. С помощью модели определялись амплитудная и угловая погрешности делителя в широком частотном диапазоне. Первоначальные результаты показали, что обеспечение погрешности, не превышающей 1% в частотном диапазоне 0–1 МГц, в конструкции невозможно. Поэтому с помощью полевых расчетов в программе BETAFields была разработана конструкция экрана, позволившего решить две задачи: уменьшить влияние паразитных емкостей на погрешности делителя и снизить напряженность электрического поля на элементах делителя, тем самым увеличив предел наибольшего рабочего напряжения.

В докладе представлена конструкция делителя и охарактеризованы конструктивные решения, позволяющие обеспечить высокое начальное напряжение короны. Сделан вывод о возможности применения разработанного делителя для регистрации перенапряжений в сетях 35 кВ с испытанием изоляции одноминутным приложением напряжения промышленной частоты 80 кВ в соответствии с ГОСТ 55195-2012.

Литература

1. **Шваб А.** Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. — 2-е изд., перераб. и доп.: пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.

А.С. Тимофеев, студ.; рук-ли Г.А. Филатова, ст. преп.;
О.А. Добрягина, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИКА ЭЭС» НА БАЗЕ СТЕНДОВ «УЧЕБНАЯ ТЕХНИКА» И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Решение задачи определения места повреждения (ОМП) в электрических сетях является одной из важных задач, связанных с реализацией концепции создания интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей. В настоящее время наибольшее распространение получили методы и устройства ОМП, основанные на измерении параметров аварийного режима (ПАР). Большой вклад в изучение методов и устройств ОМП внес Е.А. Аржанников [1]. В настоящее время на кафедре АУЭС ИГЭУ ведется разработка методов ОМП на основе ПАР под руководством В.А. Шуина [2].

Однако в связи с устареванием лабораторных стендов тематика ОМП в курсе «Автоматика ЭЭС» представлена недостаточно, и появилась необходимость в разработке и реализации новых лабораторных работ (ЛР) на базе современных стендов «Учебная Техника» и микропроцессорных (МП) терминалов, имеющих в учебной лаборатории (таких как «Сириус-ОМП» и «Сириус-2МЛ»). Основными задачами ЛР по ОМП являются: сборка схемы сети (рис. 1) на учебном стенде; подключение МП терминала к учебному стенду; изучение основ работы с терминалом и программой СТАРТ-3; выполнение экспериментов (в т.ч. изучение влияния искажающих замер факторов на точность ОМП при различных видах КЗ); обработка полученных данных; выполнение контрольных заданий.

ЛР внедряются в учебный процесс. Изучение программы «СТАРТ-3», основ работы с МП терминалами, отладка схем проведения экспериментов, изучение алгоритмов ОМП по ПАР являются частью НИР автора.

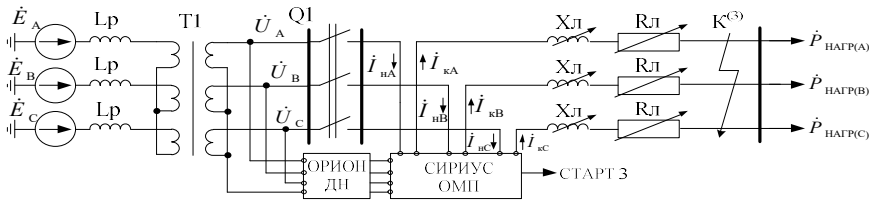


Рис. 1. Схема сети, реализуемая на стенде

Литература

1. Аржанников Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. Шуин В.А., Филатова Г.А. Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6—10 кВ по параметрам переходного процесса // Материалы XXI МНТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: Издательский дом МЭИ, 2015. Т. 3.

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

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ВЕТВЛЕНИЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Стримерный электрический разряд в значительной мере определяет процессы в системах молниезащиты, в воздушной изоляции энергетического оборудования, электроразрядных технологических установках [1]. Поэтому расчет и анализ его параметров является одной из теоретических основ исследований и разработок в этих областях.

Стримерный разряд в межэлектродном промежутке образует трехмерную структуру, развивающуюся в пространстве и времени. Она определяется взаимодействием множества стримеров, одновременно распространяющихся в промежутке, и их ветвлением [1].

В работе при помощи трехмерной математической модели стримерного разряда [2] изучены условия ветвления катодонаправленных стримеров в сильном однородном электрическом поле с напряженностью 60-80 кВ/см в воздухе при нормальных атмосферных условиях. В качестве основы была принята гипотеза о том, что к ветвлению приводит развитие крупных электронных лавин вблизи головки стримера, которые возникают из-за неравномерности распределения начальных электронов перед ней. Под крупными, в соответствии с [3], в данном случае понимаются такие лавины, которые к моменту контакта с первичным стримером уже совершили лавинно-стримерный переход либо их параметры близки к критическим.

Автор рассчитала и проанализировала расчетные распределения плотности объемного заряда и концентрации электронов в ветвящемся стримере. Показано, что ветвление происходит, если диаметр головок ветвей в ≈ 2 раза меньше расстояния между ними. Если это соотношение больше, то головки первоначально образующихся ветвей сливаются, и в дальнейшем в межэлектродном промежутке распространяется один стример.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб. и доп. М: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Белогловский А.А. Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // *Электричество*. 2011. № 11.
3. **Белогловский А.А., Рушальщикова А.В.** Изучение ветвления катодонаправленного стримера в воздухе посредством трехмерной математической модели // *Электричество*. 2016. № 7.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК» НА ЗАМЕР РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Влияние трансформации Y/Δ на замер реле сопротивления дистанционной защиты (ДЗ) при двухфазном коротком замыкании (КЗ) на примере радиальной ЛЭП с односторонним питанием рассмотрено в [1]. Для определения сопротивления на зажимах ДЗ в [1] использован метод симметричных составляющих, однако такой подход вызывает дополнительные сложности при учете влияния подпитки и других факторов. Учитывая, что различие сопротивлений прямой и обратной последовательности эквивалентной системы как правило можно пренебречь, в данной работе получено решение в фазных составляющих для схемы замещения по рис. 1.

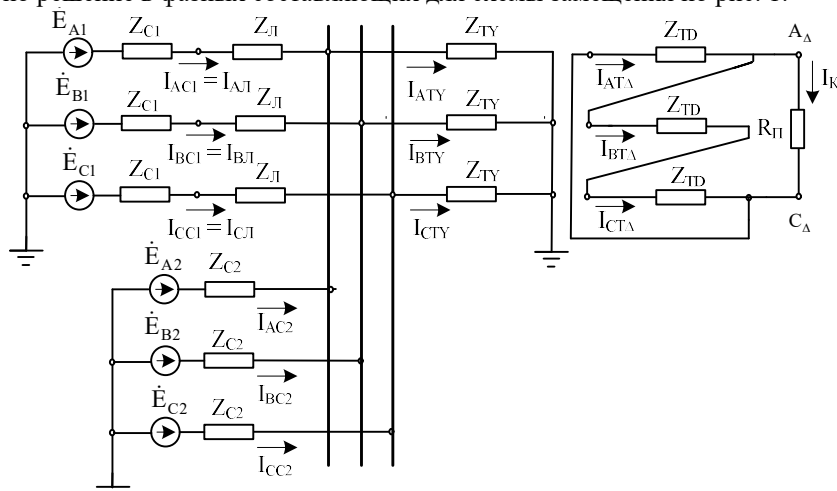


Рис. 1. Расчетная трехфазная схема замещения для определения замера ДЗ при $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta-11$

Расчетные выражения для активной и реактивной составляющих первичного сопротивления на зажимах реле сопротивления, включенного на "петлю" КЗ поврежденных фаз А и С имеют вид

$$R_{CA} = R_{Л} + \frac{R_{Г}}{K_{Т}} + \frac{1}{2} \frac{R'_{\Pi}}{K_{Т}} + \frac{\sqrt{3}}{3} (X_{C} + X_{Л} + \frac{X_{Т}}{K_{Т}}); \quad (1)$$

$$X_{CA} = X_{Л} + \frac{X_{Т}}{K_{Т}} - \frac{\sqrt{3}}{3} \left(R_{C} + R_{Л} + \frac{R_{Т}}{K_{Т}} + \frac{1}{2} \frac{R'_{П}}{K_{Т}} \right). \quad (2)$$

Полученные соотношения позволяют уточнить методику выбора уставок резервных ступеней ДЗ по условиям чувствительности при двухфазных КЗ за трансформатором с группой соединения обмоток Y/Δ-11.

Литература

1. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 344 с.

*М.А. Харахнин, А.А. Карцев, студенты;
рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Предлагается принцип построения распределенной цифровой системы релейной защиты энергообъекта как интеллектуальной мультиагентной системы. Система релейной защиты и автоматики, реализуемая в рамках данной концепции, дает возможность за счет сетевой организации активно использовать принципы построения защит, относящиеся к классу абсолютной селективности. Это позволяет повысить эффективность функционирования системы защиты.

Передача в локальную сеть мультиагентной защиты параметров, вычисленных каждым терминальным устройством — «агентом», позволит существенно сократить объем трафика, требования к скорости передачи в сети, точности синхронизации, снимает проблему пропуска отсчетов, характерную для IEC 61850 -9.2.

Распределенная обработка алгоритмов защиты каждым «агентом», располагаемым вблизи выключателя, позволяет формировать отключающий сигнал через индивидуальный резервируемый релейно-контактный модуль, а также принимать команды от «контрагентов» сети.

Резервирование локальной сети мультиагентной системы предусматривается на разных принципах с использованием оптоволоконных, проводных и беспроводных радиочастотных каналов.

Рассматривается применение дифференциальной защиты шин в рамках мультиагентной защиты. Существенным фактором, снижающим эффективность применения дифференциальной защиты шин, является насыщение магнитопроводов трансформаторов тока. Однако при возникновении короткого замыкания в начальный интервал времени (1—3 мс) до момента насыщения, информация о токе передается верно. Предлагается программно-аппаратная структура терминального типа, позволяющая вычислить параметры действующего значения первой гармоники и фазы тока короткого замыкания, передавать их в мультиагентную сеть, принимать параметры токов «контрагентов» и реализовывать алгоритмы защиты шин.

Литература

1. **Никитин А.А.** Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле: текст лекций. Издательство Чувашского университета, 2014.
2. **Хемминг Р.В.** Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980.

А.С. Холодов, студ.; рук. А.А. Волошин, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АДАПТИВНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

При включении шунтирующего реактора (ШР) возникает значительная аperiodическая составляющая, которая приводит к насыщению трансформаторов тока (ТТ) со стороны высшего и низшего напряжений. В случае если ТТ имеют разный тип или нагрузку, например при использовании ТТ наружной установки на линейном вводе и встроенного ТТ на нейтральном вводе, насыщение происходит в разные моменты времени, вследствие чего возникает ток небаланса в цепях дифференциальной защиты реактора (ДЗР). Часто значение тока небаланса превышает дифференциальный ток срабатывания защиты, что приводит к ложному срабатыванию ДЗР.

Существующие технические решения по ограничению аperiodических токов ШР, такие как устройства точной коммутации и применение предвключаемых резисторов, являются дорогими, технически сложными решением и имеют ограниченное применение.

В МП терминалах ДЗР большинства производителей не предусмотрены специальные методы по предотвращению неправильного функционирования защиты ШР в условиях возрастания дифференциального тока при насыщении одного из ТТ [1].

Существующие алгоритмы не являются эффективными т.к. они загружают защиту и значительно увеличивают зону нечувствительности ДЗР при коротком замыкании (КЗ) вблизи выводов НН.

Для решения указанных проблем был разработан адаптивный алгоритм ДЗР, позволяющий исключить ложные срабатывания при включении ШР, излишние срабатывания при внешних КЗ и минимизировать зону нечувствительности при КЗ вблизи выводов НН ШР. Адаптивный алгоритм ДЗР в реальном времени вычисляет скорости насыщения ТТ со стороны ВН и НН. При их различии производится цифровое достраивание вторичных токов и изменяется метод расчета тормозного тока.

Эффективность работы адаптивного алгоритма ДЗР подтверждена с использованием прототипа МП терминала РЗА на моделях реального времени существующих ПС реализованных в программно-аппаратном комплексе (ПАК) RTDS с передачей данных по стандарту МЭК 61850.

Литература

1. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения: пер. с англ. / под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Знак, 2008. 216 с.

*В.С. Щупак, асп.; Е.А. Волошин, асс;
рук. А.А. Волошин, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В настоящее время высокими темпами в электрические сети внедряется распределенная генерация на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). При этом существенным образом меняются соотношения рабочих токов и токов коротких замыканий в зависимости от текущего режима работы ВИЭ. Для обеспечения правильного функционирования релейной защиты и автоматики в таких условиях необходимо автоматическое изменение параметров срабатывания релейной защиты и автоматики.

Для этих целей на кафедре РЗиАЭ НИУ «МЭИ» разрабатывается автоматическая система расчета параметров срабатывания релейной защиты и автоматики. Разрабатываемая система имеет два уровня. Первый — уровень подстанций и электростанций. На первом уровне решаются задачи ведения информационной модели объекта (подстанции или электростанции) и сбора текущих данных о состоянии оборудования, включая данные векторных измерений. Второй уровень — уровень диспетчерского центра или научно-исследовательского центра. На втором уровне решаются задачи автоматического формирования расчетной схемы модели, определения требуемых эквивалентов ЭЭС и верификации модели по данным измерений. По данным, получаемым с первого уровня, модель энергосистемы формируется автоматически, путем соединения информационных моделей отдельных энергообъектов в одну расчетную модель. Автоматическая система расчета параметров срабатывания обеспечивает выполнение специализированных сервисов по автоматическому расчету требуемых параметров аварийного режима (например, максимальных и минимальных токов КЗ) и расчет параметров срабатывания. Рассчитанные параметры срабатывания затем передаются по каналам телемеханики на энергообъекты для изменения настроек МП устройств РЗА. Внедрение автоматической системы расчета параметров срабатывания релейной защиты позволит перейти к созданию интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики, обладающих свойствами самонастройки и самоорганизации [1], что необходимо для создания интеллектуальной электроэнергетической системы [2].

Литература

1. **Применение** оптимизационных методов для функционально-интегрированной систем релейной защиты и автоматики /А.Ф. Дьяков и др. // Релейщик. 2016. № 1. С. 24—31.
2. **Концепция** развития интеллектуальной электроэнергетической России с активно-адаптивной сетью. ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УЧЕТА ВТОРИЧНОГО УНОСА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ

Методика расчета степени очистки дымовых газов в электрофильтрах в основном основывается на прямом осаждении поступающих на вход частиц золы, но при этом процессы вторичного уноса не учитываются. На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» разработана обобщенная модель процессов, в которой в равной степени учитываются как процессы прямого осаждения, так и вторичного уноса возвращенной пыли. Разработанная методика расчета прямого осаждения частиц позволяет учесть разброс заряда частиц, связанный с турбулентным характером потока газа, а также особенность процесса вторичного осаждения. Создана модель процессов в электрофильтре, которая основана на балансе материальных потоков для каждого элемента длины электрофильтра [1].

Анализ экспериментальных данных [2] позволяет построить распределения по длине потоков осаждения, потоков в бункер, вторичного уноса и проскоков. Сравнение с экспериментальными данными, свидетельствует о том, что разработанная модель правильно отражает общий характер распределений.

Проведенные исследования [3] очистки дымовых газов на полномасштабном опытном электрофильтре позволяют установить пропорциональную связь между потоком частиц попадающих в бункер и массой слоя золы на осадительных электродах. Особенностью такого исследования является то, что помимо газодинамических и оптических измерений концентрации золы в газе на входе и на выходе из электрофильтра производилось автоматическое взвешивание массы пыли на каждой группе осадительных электродов и в каждом из бункеров. Такая особенность позволяет с большой точностью провести сравнение разработанной модели с результатами проведенных исследований.

Литература

1. **Верещагин И.П., Смагин К.А., Тимофеев Е.М., Хренов С.И., Чекалов Л.В.** Новый подход к расчету степени очистки газов от золы в электрофильтрах // *Электротехника*. 2016. 08.
2. **G. Bacchiega, N. Caraman, I. Gallimberti.** Development of an industrial model of rapping-effect on the collecting efficiency // X ICESP, Cairns-Australia, 2006.
3. **G. Bacchiega, I. Gallimberti.** Experimental study of the mass balance in a pilot industrial electrostatic precipitator // *J. Electrostat.* 2006.

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ — ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА

Секция 38. Атомные электрические станции и установки	5
Секция 39. Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии.....	24
Секция 40. Теплофизика	35
Секция 41. Техника и физика низких температур.....	65
Секция 42. Нанотехнологии.....	79

НАПРАВЛЕНИЕ — ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Секция 43. Котельные установки и охрана окружающей среды	95
Секция 44. Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС	123
Секция 45. Схемы и режимы работы тепловых электрических станций	163
Секция 46. Контроль, автоматизация и управление в энергетике	193

НАПРАВЛЕНИЕ — ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

Секция 47. Энергетические установки и двигатели.....	241
Секция 48. Проблемы технологии, надежности и конструирования	279
Секция 49. Робототехнические и мехатронные системы	292

НАПРАВЛЕНИЕ — ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Секция 50. Электроэнергетические системы.....	307
Секция 51. Электроснабжение.....	331
Секция 52. Электрические станции	335
Секция 53. Возобновляемые источники энергии	370
Секция 54. Электрофизика и системы управления электроэнергетических объектов	396

Научное издание

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭНЕРГЕТИКА

**Двадцать третья Международная научно-техническая
конференция студентов и аспирантов**

Тезисы докладов

В 3 томах

Том 3

Корректор *Г.Ф. Раджабова*
Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета *М.Н. Маркиной*

Подписано в печать 30.01.17
Печать цифровая

Формат бумаги 60×84/16
Усл. п.л. 26,1

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, 2-я Кабельная ул., д. 2