

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК  
АССОЦИАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОТДЕЛОВ  
ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ СТРАН  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ (АМО)

---

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

---

ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

26-27 февраля 2015 г.  
МОСКВА

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

ТОМ  
**4**



МОСКВА

Издательский дом МЭИ

2015

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА:** Двадцать первая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 303 с.

ISBN 978-5-383-00921-5

ISBN 978-5-383-00925-3 (Том 4)

Помещенные в четвертом томе сборника тезисы докладов студентов и аспирантов российских и зарубежных вузов освещают основные направления теплоэнергетики, энергомашиностроения и электроэнергетики.

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

Тезисы печатаются с авторских оригиналов методом прямого репродуцирования. В отдельных случаях в авторские оригиналы внесены изменения технического характера. Как правило, сохранена авторская редакция.

---

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

**Н.Д. Роголев** — ректор МЭИ, 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** — пом. проректора по научной работе

**А.Е. Тарасов** — начальник УМС

**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** — и.о. директора ИнЭИ

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

**П.В. Шамигулов** — директор филиала в г. Волжском

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

**Н.И. Файрушин** — директор Энергетического колледжа (филиал МЭИ)

в г. Конаково

**Сакал Петер** — профессор Института организации производства, менеджмента и качества (г. Трнава, Словакия)

ISBN 978-5-383-00921-5

ISBN 978-5-383-00925-3 (Том 4)

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2015

**Направление**  
**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

Научный руководитель направления —  
зав. каф. АСУТП,  
д.т.н., профессор А.В. Андрюшин



## Секция 43

# **КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*Председатель секции — д.т.н., профессор В.Б. Тупов*

*Секретарь секции — к.т.н., доцент С.А. Семин*

*Н.В. Авинов, студ.; рук. В.В. Авинов, асс. (СамГТУ, г. Самара)*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ТОЛЬЯТТИНСКОЙ ТЭЦ**

Тольяттинская ТЭЦ (ТоТЭЦ) является одним из основных источников отпуска тепловой энергии с горячей водой для отопления и горячего водоснабжения жилых районов и предприятий города.

Для оценки эффективности ее работы были проведены исследования магистральной (внутристанционной) теплосети и сети собственных нужд ТоТЭЦ. В первом случае была поставлена задача по оценке потенциальных возможностей ее работы [1], а во втором было необходимо оценить ее состояние [2].

По результатам проведенных исследований проанализированы основные показатели работы теплосетей ТоТЭЦ – общие затраты тепла и сетевой воды, гидравлический и тепловой режимы работы теплосетей, а также разработаны мероприятия по их модернизации [3].

По магистральной (внутристанционной) теплосети помимо исследования режимов ее работы при увеличении тепловой мощности рассмотрено несколько режимов работы теплосети, различных по составу работающего оборудования (насосов и сетевых подогревателей), при которых обеспечиваются заданные параметры на тепловыводах (расход, давление и температура) с учетом допустимых отклонений по нормам ПТЭ. А также рассмотрен вариант модернизации схемы теплосети, предлагаемый работниками турбинного цеха ТоТЭЦ.

По теплосети собственных нужд ТоТЭЦ на основе экспериментальных данных (расходов сетевой воды и ее температур на входе в объект и выходе из него) были рассчитаны фактические расходы тепла на потребителей. Также были выполнены расчеты фактических расходов сетевой воды потребителями теплосети и определены причины превышения потерь тепла через изоляцию трубопроводов. Рассчитан экономический эффект от снижения расхода сетевой воды на собственные нужды ТоТЭЦ.

## Литература

1. **Кудинов А.А., Авинов В.В., Зиганшина С.К.** Исследование режимов работы внутростанционной тепловой сети Тольяттинской ТЭЦ // Электрические станции. 2006. № 4.
2. **Кудинов А.А., Авинов В.В.** Исследование режимов работы теплосети Тольяттинской ТЭЦ// Современные техника и технологии: XIV Международная научно-практическая конференция. Томск, 2008. Т. 3.
3. **Сергеева А.С., Авинов В.В.** Основные направления по модернизации тепловых сетей Тольяттинской ТЭЦ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVII МНТК студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. Т. 3.

П.С. Величкин, Е.Н. Мясоедова, студенты;  
рук-ли М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц.;  
О.А. Степанова, к.т.н., доц., зав. каф. (ГУ им. Шкаридина, г. Семей)

## РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ

Компьютерное моделирование процессов в теплоэнергетическом оборудовании позволяет изучать процессы горения топлива и теплообмена без создания физических моделей и проведения реальных испытаний, что значительно снижает финансовые затраты и предотвращает непредсказуемые последствия данных испытаний [1].

Первым шагом при моделировании является построение твердотельной модели и разбиение ее на конечные элементы. При моделировании допускается делать упрощения для облегчения решения конкретной задачи. Правильное создание конечно-элементной модели – это необходимое условие для получения достоверных результатов моделирования.

Целью данной работы является построение конечно-элементной модели топочных экранов котла КЕ-25-14-С для исследования температурных полей. Необходимо построить твердотельную модель топочного экрана, а также разбить полученную твердотельную модель на конечные элементы.

Котлы КЕ-25-14-С имеют плотные боковые экраны из труб диаметром  $51 \times 2,5$  мм, расположенных с шагом 58 мм [2]. При моделировании температурных полей возможно упростить модель путем построения плоской стенки размером  $4600 \times 2500 \times 2,5$  мм, что соответствует правому экрану, а не стенки из труб, что значительно упрощает расчеты, не снижая достоверности получаемых результатов. После построения твердотельной модели была наложена квадратная расчетная сетка (рис. 1), так как этот вид сетки оптимален для прямоугольного тела.

В результате была построена модель правого экрана котла КЕ-15-14-С и наложена расчетная сетка прямоугольного типа. Создана конечно-элементная модель, содержащая 1653 элемента и 3480 узлов. Данную модель можно применять для моделирования температурных полей поверхности нагрева котла.

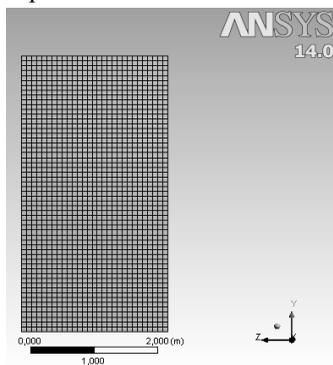


Рис. 1. Конечно-элементная модель правого топочного экрана котла КЕ-25-14-С

### Литература

1. Югов В.П. Решение задач теплообмена. М: Мир, 2001.
2. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы. М: Энергоатомиздат, 1987.

*С.И. Демидова, студ.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВОПРОСЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА ОТ МАЛЫХ КОТЕЛЬНЫХ**

Котельные небольшой мощности 10–20 МВт располагаются в непосредственной близости от жилых районов. Очень часто жилые дома находятся сразу за оградой таких котельных. Жилые дома от ТЭЦ или ТЭС находятся на большом расстоянии. Санитарно-защитная зона от них гораздо больше и составляет 500–1000 м [1–2]. Натурные измерения показывают, что в этом случае шум от этих котельных, может быть причиной превышения санитарных норм в окружающем районе. По результатам измерений около трех котельных тепловой мощностью 10, 12 и 18 МВт с котлами «WOLF» DKS-Dynatherm 3200 и «WOLF» DKS-Dynatherm 4000 определены превышения санитарных норм, которые составляют до 15 дБА около ближайших жилых домов. Жилые дома от этих котельных находятся на расстоянии 35–50 м. Определено, что основными источниками излучения шума являются срезы дымовых труб. Причиной излучения шума от срезов котлов являются шумы при процессах горения внутри котлов. Акустические расчеты показали, что необходимо снизить уровень шума от газовых трактов этих котельных как в низкочастотной, так и высокочастотной части спектра. Величина требуемого снижения составляет десятки децибел. Вторым источником шума является шум от воздухозаборных окон в зданиях котельных. Здесь величина требуемого снижения существенно меньше. Источником шума является проникающий из помещений шум от корпусов котлов, насосов и вентиляторов. Известно, что технологические способы снижения шума от этих котлов не дали положительного результата. Поэтому рассмотрены возможные способы снижения шума от каждого источника шума на путях их распространения. Показано, что для снижения шума от срезов дымовых труб необходимо использовать специальные глушители, позволяющие снижать шум как на низких, так и высоких частотах. Особый глушитель требуется также и для снижения шума от воздухозаборного окна. Рассмотрены возможные типы глушителей для каждого источника излучения.

### **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.

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

## **ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В БЕЗРЕШЕТОЧНОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

В настоящее время в энергетике широко применяются пылеугольные топki камерного сжигания. Котлы с такими топками имеют потери с механическим недожогом на уровне  $q_4 = (0,5-6 \%)$  в зависимости от реакционнойности топлива и способа шлакоудаления. Кроме того, конструкции таких топок применяют в котлах самого широкого диапазона мощностей. Однако в данных конструкциях налагаются жесткие требования к качеству топлива и его приготовления, также они не являются универсальными по топливу.

Известны также и широко применяются за рубежом котлы с топками кипящего слоя. Главным достоинством данных котлов является возможность сжигания с высокой эффективностью твердых топлив ухудшенного качества ( $q_4 = 1-25 \%$ ) в зависимости от режимных и конструктивных параметров и вида топлива [1]. Причем в данных топках возможно сжигать разные, отличные от проектного, виды твердых топлив без тонкого помола (достаточно дробления). Однако капитальные затраты на установку котла с кипящим слоем становятся значительными.

Возможным компромиссным способом сжигания твердого топлива в современных российских условиях могла бы стать технология безрешеточного кипящего слоя (БКС), разработанная на кафедре КУиЭЭ МЭИ. Псевдоожижающий агент здесь в отличие от традиционного кипящего слоя, подается не через воздухораспределительную решетку, а через сопла нижнего дутья, расположенные в шахматном порядке на стенах шлакового комода с наклоном вверх. Топливо подается через прямоточные горелки, расположенные в один-два яруса на стенах топki с наклоном вниз. Таким образом, ожидается интенсивная циркуляция частиц в холодной воронке топki, подобной циркуляции в кипящем слое. Предлагаемая технология совмещает достоинства кипящего слоя и факельного сжигания при минимуме капитальных затрат. Это позволит сжигать топливо огрубленного помола, а также сжигать разные сорта углей в одной топочной камере.

В настоящее время авторами проводятся исследования гидродинамики БКС на физических и математических моделях с целью выявления основных закономерностей циркуляции в нем твердых частиц и оптимизации конструкции топочной камеры.

### **Литература**

1. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топki с кипящим слоем. М.: Энергоатомиздат, 1996.

*М.Т. Каримов, студ.; рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц.  
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛОЙ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЯ РАЗРЕЗА «КАРАЖЫРА»**

В настоящее время обеспечение безопасности и надежной эксплуатации ТЭС является важной проблемой энергетики. В данной работе рассматривается важная проблема, которая может привести к аварийной остановке котла. За счет высоких скоростей и абразивных свойств частиц золы происходит эрозионный износ поверхностей нагрева котла. Эрозионный износ утончает стенки труб теплообменных аппаратов, что влечет за собой частичную или полную остановку котла [1]. Исследование эрозийного износа поверхностей нагрева и применение полученных данных на практике в дальнейшем приведет к эффективной эксплуатации оборудования.

Использовались численные и экспериментальные методы исследований динамики эрозионного износа поверхностей нагрева.

В исследованиях рассматривался отопительный период с 15 октября по 15 апреля для котельных, работающих на угле разреза «Каражыра» (Восточно-Казахстанская область, Республика Казахстан) при слоевом и пылевидном способах сжигания топлива. Результаты экспериментов были обработаны на ПЭВМ с помощью Excel.

Многочисленные наблюдения показали, что конвективные поверхности нагрева изнашиваются неравномерно. Больше всего истираются конвективные поверхности нагрева крайних змеевиков, прямые участки труб, отходящих от коллекторов, места изгиба труб. Из полученных аналитических зависимостей видно, что максимальный износ трубы возникает в тех случаях, когда угол атаки  $45^\circ$ , причем характер износа остается одним и тем же при изменении скорости газа [2].

Необходимо изучить интенсивность образования эрозионного износа при жидком шлакоудалении и рассмотреть различные способы защиты от эрозионного износа поверхностей нагрева котла.

### **Литература**

1. **Аэродинамические** исследования процесса износа пучков труб экономайзера // <http://sibac.info/> URL: <http://sibac.info/index.php/2009-07-01-10-21-16/2824-2012-05-26-12-37-49> (дата обращения: 26.05.2012).
2. **Баранов П.А.** Предупреждение аварий паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.

*А.П. Ларин, студ.; рук. С.К. Зиганшина, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ВОЗДУХА ДЫМОВЫХ ТРУБ ТЭС**

Разработаны способы утилизации теплоты вентилируемого воздуха дымовых труб ТЭС. Предложено выходящий из воздушного канала дымовой трубы подогретый воздух направлять в короб подвода воздуха к калориферу, т. е. осуществлять его рециркуляцию, или направлять в котельный агрегат для горения топлива [1]. Установлено, что при рециркуляции подогретого в калорифере воздуха затраты на осуществление надежной работы дымовой трубы ст. № 2 Самарской ТЭЦ в среднем уменьшатся на 5,097 млн руб/год. Если энергетический котел работает на природном газе, то дутьевой воздух перед подачей в топку котла подается в воздухоподогреватель при температуре 30 °С, т. е. после предварительного подогрева в калорифере. Определено, что отношение количества теплоты, затрачиваемого на нагрев наружного воздуха перед его подачей в воздушный канал дымовой трубы ст. № 2 Самарской ТЭЦ, к количеству теплоты, затрачиваемому на нагрев дутьевого (наружного) воздуха перед подачей его в воздухоподогреватель котла БКЗ-420-140 НГМ, равно 0,38 [1]. В этом случае экономия тепловой энергии составляет 5880 МВт·ч/год (3,946 млн руб/год при себестоимости 1 Гкал теплоты 780,5 руб.).

Кроме того, предложено подогретый воздух из воздушного канала дымовой трубы подавать в пристенный слой дымовых газов, движущихся по газоотводящему каналу, через отверстия, выполненные в футеровке, или посредством кольцевого перфорированного коллектора переменного поперечного сечения, установленного в основании газоотводящего канала дымовой трубы [2, 3]. Установлено, что подмешивание 30÷20 % по объему воздуха к уходящим газам позволяет снизить их влагосодержание до 0,05÷0,06 кг/кг с.г. и одновременно снизить точку росы до 41÷45 °С, а подмешивание 50 % по объему воздуха к уходящим газам позволяет снизить их точку росы до 37 °С. Снижение точки росы дымовых газов, движущихся в пристенном слое газоотводящего канала, исключает выпадение из них конденсата водяных паров на внутренней поверхности футеровки дымовой трубы, что повышает надежность ее работы.

### **Литература**

1. **Зиганшина С.К., Кудинов А.А.** Способы утилизации теплоты вентиляционного воздуха дымовых труб ТЭС // Электрические станции. 2010. № 4.
2. **Патент № 2415336 (РФ).** Котельная установка / С.К. Зиганшина, А.А. Кудинов, С.П. Горланов // Открытия. Изобретения. 2011. № 9.
3. **Патент № 2305225 (РФ).** Котельная установка / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, И.Н. Горбачёв // Открытия. Изобретения. 2007. № 24.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОТЛОВ

Эффективность работы котельного оборудования характеризуется множеством технологических параметров, что затрудняет выбор режимов работы оборудования.

В настоящее время для многокритериального оценивания широко используется метод DEA, который в русскоязычной литературе называется методом анализа среды функционирования (АСФ) [1].

Для определения обобщенной сравнительной эффективности однотипных котлов, работающих на одной производительности, согласно методу DEA построим функционал:

$$f_{\text{техн}} = \max_{c_{in} \in G} \frac{1}{c_{1n} t_{yx n} + c_{2n} \Delta P_n}, n = 1, 2, \dots, N,$$

где  $t_{yx n}$  – температура уходящих газов;  $\Delta P_n$  – отклонение от нормы разряжения в топке;  $c_{in}$  – весовые коэффициенты.

Система ограничений, которая определяет область значений весовых коэффициентов  $G$  представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{c_{11} t_{yx1} + c_{21} \Delta P_1} \leq 1; \\ \frac{1}{c_{12} t_{yx2} + c_{22} \Delta P_2} \leq 1; \\ \dots \\ \frac{1}{c_{1n} t_{yx n} + c_{22} \Delta P_n} \leq 1. \end{cases}$$

Для получения максимального значения обобщенного критерия эффективности необходимо минимизировать выбранные параметры.

Предложенный метод повышает объективность сравнительной оценки, определяя весовые коэффициенты технологических параметров, и позволяет подобрать оборудование, учитывая его техническое состояния на данный момент.

### Литература

1. Салов А.Г., Гаврилова Ю.В., Кухарева А.В. Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования тепловых электрических станций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 3(31).

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Оценка эффективности работы теплогенерирующего оборудования может проводиться по множеству параметров. Поставлена задача определить оптимальные режимы работы котельных агрегатов по экологическим параметрам.

Методология DEA [1] позволяет провести многокритериальное оценивание объектов. Для решения поставленной задачи сформируем функционал в виде:

$$f_{\text{техн}} = \max_{c_{in} \in G} \frac{1}{a_{1n}C_{\text{CO}_2n} + a_{2n}C_{\text{NO}n} + a_{3n}C_{\text{NO}_2n}}, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где  $C_{\text{CO}_2}$ ,  $C_{\text{NO}_2}$ ,  $C_{\text{NO}}$  – концентрация двуокиси углерода, двуокиси азота и окиси азота в уходящих дымовых газах;  $a_{1n}$ ,  $a_{2n}$ ,  $a_{3n}$  – весовые коэффициенты.

Введем систему ограничений.

$$\begin{cases} \frac{1}{a_{11}C_{\text{CO}_21} + a_{21}C_{\text{NO}1} + a_{31}C_{\text{NO}_21}} \leq 1, \\ \frac{1}{a_{12}C_{\text{CO}_22} + a_{22}C_{\text{NO}2} + a_{32}C_{\text{NO}_22}} \leq 1, \\ \dots \\ \frac{1}{a_{1n}C_{\text{CO}_2n} + a_{2n}C_{\text{NO}n} + a_{3n}C_{\text{NO}_2n}} \leq 1. \end{cases}$$

Решая задачи математического программирования, определим значения комплексных критериев эффективности котлов и весовых коэффициентов экологических параметров, что позволяет избавиться от субъективизма их оценки.

Совокупная оценка сравнительной эффективности однотипных котлов позволяет выбрать оборудование и дать рекомендации по режимам эксплуатации.

### Литература

1. Салов А.Г., Гаврилова Ю.В., Кухарева А.В. Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования тепловых электрических станций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 3(31).

*Д.А. Розанов, асп.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА ПРИ РАСШИРЕНИИ ТЭЦ БЛОКАМИ ПГУ**

В настоящее время все больше электростанций модернизируется блоками ПГУ. Основной экологической проблемой, связанной с их эксплуатацией, является шумовое загрязнение. ТЭЦ находятся в черте города, а зачастую и вплотную прилегают к жилому району, вследствие чего суммарный уровень звука за границей санитарно-защитной зоны не должен превышать с учетом ужесточающей поправки 40 дБА. С целью определения требуемого снижения шума от оборудования ТЭЦ необходимо проведение акустических расчетов [1].

В ходе акустических измерений определяются уровни звукового давления в окружающем ТЭЦ районе. Расчетным путем определяется требуемое снижение уровня шума от каждого источника шума. Для каждого источника, имеющего превышение санитарных норм, разрабатываются мероприятия, позволяющие снизить шум на территории жилой застройки до санитарных норм.

Исследования с моим участием проводились на одной московской станции, где сейчас монтируется блок ПГУ-220Т. На этой ТЭЦ произошло ужесточение санитарных норм: снижение уровня шума с 80 до 40 дБА. Это связано с изменением назначения прилегающей территории – с производственной на многофункциональную общественно жилую зону.

Акустические расчеты от оборудования ТЭЦ позволили определить суммарные уровни звукового давления как от источников постоянного шума (газопроводы, ГРП, трансформаторы, воздухозаборы ЭК), так и от источников временного воздействия (паровые выбросы). На основании расчетов и измерений определены источники шума как от существующего оборудования ТЭЦ, так и вновь устанавливаемого, для которых необходимы меры по шумоглушению. Выполнен комплекс акустических расчетов в соответствии с СНиП 23-03–2003 ГОСТ 31295.1–2005 «Затухание звука при распространении на местности» с помощью немецко-голландской программы «Predictor». Рассмотрены и предложены варианты проведения мероприятия по снижению уровня звука от каждого отдельного источника шума, расположенного на территории электростанции [2].

### **Литература**

1. **СНиП 23-03–2003.** Нормы проектирования. Защита от шума. М.: Госстрой России, 2004.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

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

## **РАЗРАБОТКА МЕР ПО СНИЖЕНИЮ ШУМА ОТ ВЕНТИЛЯЦИИ ПГУ**

В настоящее время в России все большее внимание уделяется снижению неблагоприятных воздействий от работы промышленных и энергетических объектов на человека. Одним из таких факторов является шум.

В данной работе в качестве источника шумового воздействия на окружающий жилой район рассматривается энергоблок парогазовой установки (ПГУ) мощностью 220 МВт, за счет строительства которого проводится модернизация существующей теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). В непосредственной близости от строящегося энергоблока ПГУ запланировано размещение многофункциональной общественно-жилой зоны, в которой должны выполняться санитарные нормы по фактору шума для территории, прилегающей к жилым домам, в дневное и ночное время. А так как среди энергооборудования ПГУ является самым мощным источником постоянного шума [1], то вопрос обеспечения акустической безопасности в окружающем районе приобретает особую актуальность. В качестве вспомогательного оборудования в состав блока ПГУ входят вентиляторы главного корпуса и трансформаторной ПГУ, которые также являются источниками шума. Целью работы является определение требуемого снижения шума от указанных вентиляторов и разработка для них мер по шумоглушению.

Выполненный посредством компьютерного моделирования по действующей в России нормативной методике [2] акустический расчет позволил определить требуемое снижение шума от каждого из крышных вентиляторов и осевых вентиляторов главного корпуса и трансформаторной ПГУ.

В работе рассмотрены различные конструкции глушителей шума (диссипативные, реактивные, активного типа). В качестве меры по снижению шума от вентиляторов приняты диссипативные глушители пластинчатого типа, позволяющие обеспечить необходимую акустическую эффективность при умеренных дополнительном аэродинамическом сопротивлении и массе глушителей, определены геометрические характеристики глушителей шума, рассчитана их акустическая эффективность.

Применение глушителей шума выбранной конструкции позволит снизить уровень шума от систем вентиляции ПГУ в окружающем районе до санитарных норм.

### **Литература**

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **ГОСТ 31295.2–2005** (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. М.: Стандартинформ, 2006.

*Е.А. Соломатин, студ.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА ОТ ПГУ С КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ**

Возможность широкого внедрения ПГУ будет определяться во многом шумовыми характеристиками оборудования, его шумовым влиянием на окружающий район.

Различают шумы, излучаемые от ПГУ через воздухозаборный тракт ГТУ и выхлопной тракты котлов-утилизаторов, а также от корпусов ГТУ и котлов-утилизаторов. Первые два пути распространения шума являются наиболее интенсивными по воздействию на окружающую среду. Влияние шума от корпусов агрегатов ГТУ и котлов-утилизаторов определяется звукоизолирующими свойствами помещения, где оно установлено, и, как правило, невелико [1].

Как правило, ПГУ поступают с глушителями для воздушных трактов ГТУ.

До настоящего времени не изучен до конца вопрос снижения шума от газовых трактов ПГУ с котлами-утилизаторами. Шум, который излучается от газовых турбин, снижается при прохождении газового тракта котла-утилизатора. Учет этого снижения при разработке мер по шумоглушению выхлопных трактов ПГУ позволяет уменьшить требуемое снижение шума, что приводит к созданию более компактной конструкции глушителя шума. Рассматриваются различные конструкции диссипативных глушителей с размещением их в котле-утилизаторе, после него – во внешнем газоходе, а также в дымовой трубе. Приведено сравнение различных схем шумоглушения. Рассматривается вопрос использования активных систем снижения шума.

Отдельно рассмотрен вопрос снижения шума от паровых выбросов котлов-утилизаторов. Предложены конструкции паровых глушителей.

### **Литература**

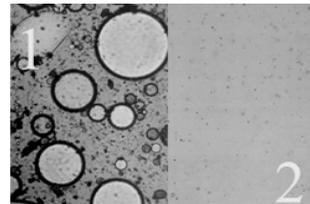
1. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М: Издательский дом МЭИ, 2005.

М.А. Сысоев, Д.С. Ценёв, студенты;  
рук-ли В.И. Кормилицын, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);  
Д.А. Горр (ОАО ТКЗ «Красный котельщик»)

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКИ СЖИГАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

Истощение существующих ресурсов невозобновляемых источников энергии открывает определенные перспективы в использовании альтернативных видов топлив, к которым относятся, например, топливные гранулы на основе торфа или древесины и жидкое топливо, получаемое при обработке смеси жидких сельскохозяйственных отходов и мазута. Основными преимуществами использования этих топлив являются легкая транспортировка и низкое содержание вредных веществ при их сжигании [1].

В рамках выполненных работ проведена оценка сжигания в котле БКЗ-210-140 жидкого топлива, полученного при кавитационной обработке смеси мазута и воды ( $W_p$  до 10 %). На рис. 1 приведено сравнение микроструктуры топливной смеси с различной степенью кавитационной обработки. Как видно из рисунка, кавитационная обработка позволяет существенно улучшить взаимное перемешивание компонентов смеси. Для оценки основных показателей котла при сжигании данного топлива использована расчетная программа «ТРАКТ».



**Рис. 1. Микроструктура топливной эмульсии**

1 – до кавитационной обработки; 2 – после кавитационной обработки

Приготовление топливных гранул на основе торфа по технологии НИУ «МЭИ» также предполагает использование кавитационной обработки смеси воды и торфа для получения связующего вещества. Получаемые по данной технологии топливные гранулы на основе торфа имеют высокую теплоту сгорания и прочность. Добавление отходов (например, резиновой крошки бывших в употреблении автопокрышек) не только позволяет увеличить долю утилизируемых отходов, но и повысить теплотворную способность получаемых гранул (до 4500 ккал/кг) [1].

### Литература

1. **Приготовление** и сжигание альтернативных топлив / В.И. Кормилицын, Д.А. Горр, Г.С. Догадин и др. // Вестник МЭИ. 2012. № 3.

А.А. Тараторин, асп.; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## РАЗРАБОТКА ПАРОВОГО ГЛУШИТЕЛЯ ПРИ СТЕПЕНИ НЕРАСЧЕТНОСТИ СТРУИ, БЛИЗКОЙ К ЕДИНИЦЕ

На ТЭС и других объектах производственного назначения имеют место выбросы низкопотенциального пара с малыми расходами (например, пар от БРОУ), которые могут осуществляться через паропроводы с большими диаметрами. Перечисленные факторы приводят к тому, что на выходе в окружающую среду струя имеет давление, равное атмосферному (степень нерасчетности струи равна единице), а также умеренную скорость, что обуславливает невысокие значения звуковой мощности, излучаемой непосредственно от струи. Шум, распространяющийся от среза выхлопного паропровода в рассматриваемых случаях, генерируется при дросселировании пара и достигает значительных величин: 140–150 дБ, что объясняет необходимость установки глушителей шума на выхлопные паропроводы.

Для снижения шума выброса пара с параметрами: расходом – 19,4 кг/с, давлением перед БРОУ – 1,6 МПа и температурой – 250 °С, сбрасываемого при пусках ПГУ через БРОУ 140/13 ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго» авторами была разработана конструкция глушителя шума, позволяющая обеспечить заданный уровень звука 80 дБА на расстоянии 15 м от шумоглушителя. Глушитель представляет собой шесть пластин толщиной 100 мм, заполненных звукопоглощающим материалом, установленных в цилиндрическом корпусе. Перед входом в пластины предусмотрено расширение пара в диффузоре. Торцы пластин закрываются обтекателями.

Акустическая эффективность глушителя, полученная сравнением УЗД на расстоянии 15 м от выхлопа без глушителя согласно расчету по [1] с результатами акустических измерений выброса пара через глушитель, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Акустическая эффективность глушителя	3	9	20	32	35	38	29	19

Разработанная конструкция показала свою эффективность и рекомендуется к установке при сбросах пара со степенью нерасчетности, близкой к единице.

### Литература

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

## СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИВОД ДЫМОСОСА ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРАКТА

Величина аэродинамического сопротивления газового тракта ТЭС напрямую влияет на расход электроэнергии на привод дымососов. С увеличением аэродинамического сопротивления газового тракта увеличиваются затраты электроэнергии на привод дымососов. В современных условиях увеличения стоимости топлива увеличивается актуальность вопроса снижения затрат электроэнергии на привод тягодутьевых машин. В эксплуатации на множестве тепловых электрических станций России находятся котлы с повышенным относительно проектного значения аэродинамическим сопротивлением газового тракта. Это вызвано установкой в газоходах котлов дополнительного оборудования, изменением вида и характеристик сжигаемого топлива, техническими недочетами при реконструкции элементов газового тракта и поверхностей нагрева котлов. Необходимо отметить также, что нормативная литература по проектированию и расчету газовых трактов ТЭС [1, 2] разрабатывалась в 1970–1980 годы и не дает достаточно полных рекомендаций по выполнению всех элементов газового тракта.

Данная работа посвящена анализу влияния величины аэродинамического сопротивления газового тракта на затраты электроэнергии на привод дымососов и, как следствие, на величину собственных нужд станции. Установлено, что снижение аэродинамического сопротивления газового тракта блока 300 МВт на величину, равную 200 Па, позволит снизить расход электроэнергии на привод дымососов и добиться значительной (1–1,5 млн руб/год) экономии денежных средств. Расчет экономических показателей показывает, что мероприятия по реконструкции газовых трактов ТЭС с целью снижения их аэродинамического сопротивления целесообразны в случаях, когда возможно существенное снижение аэродинамического сопротивления. В ходе проведенного анализа выявлены элементы газовых трактов действующих ТЭС, реконструкция которых позволит существенно, на 200 Па или более чем в 2 раза, снизить их аэродинамическое сопротивление.

### Литература

1. **Рихтер Л.А.** Газовоздушные тракты тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. **Аэродинамический** расчет котельных установок (Нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. Л.: Энергия, 1977.

*Б.В. Тупов, асп.; рук. В.Т. Медведев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА В СЛОЖНЫХ ГАЗОВОЗДУХОПРОВОДАХ КОТЛОВ, СООТВЕТСТВУЮЩЕГО МИНИМАЛЬНОМУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ**

Для решения проблемы снижения шума от энергетических газозвдухопроводов во всем мире широко используются пластинчатые глушители. Установка таких шумоглушителей связана с увеличением аэродинамического сопротивления, которое определяет дополнительные затраты на собственные нужды, необходимость принятия решений по изменению проходного сечения канала. Особенно это важно для больших каналов, где происходит транспортировка больших объемов газа, поэтому аэродинамическое сопротивление является важной характеристикой того или иного глушителя. В справочной литературе [1] приводятся данные, по которым можно рассчитать аэродинамическое сопротивление пластинчатых глушителей в прямом канале. Здесь отмечается, что в сложных каналах имеет место взаимное влияние на аэродинамическое сопротивление отдельных элементов, особенно близкорасположенных друг к другу, и отсутствуют сведения о том, как это учитывать. Решить задачу местоположения глушителя, соответствующего минимальному аэродинамическому сопротивлению, путем физического моделирования для больших каналов затруднительно. Поэтому целесообразно использовать для этой задачи специальные пакеты программ, например Flow Simulation программного комплекса SolidWorks [2].

Проведенное математическое моделирование по указанной программе позволило определить местоположение ступеней пластинчатого глушителя до и после прямого поворота, соответствующее минимальному аэродинамическому сопротивлению. Показано, что учет местоположения ступеней пластинчатого глушителей до и после прямого поворота позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление более чем на 20 %.

Указанные рекомендации внедрены при установке двухступенчатого глушителя в газовых трактах энергетических котлов ст. №№ 6, 7, 8 ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго» в 2013 г., что подтверждено актом внедрения. Аэродинамическое сопротивление двухступенчатого глушителя при несении эксплуатационной нагрузки составило всего 3,51 мм вод. ст.

### **Литература**

1. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. 1975.
2. **SolidWorks.** Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

*М.В. Фоменко, асп.; рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ СЖИГАНИЯ КУЗНЕЦКОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТШУ НА ПАРОВЫХ КОТЛАХ ТПП-210А ТЭЦ-22 ОАО «МОСЭНЕРГО» С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

На ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» установлено три прямоточных двухкорпусных котла ТПП-210А, которые спроектированы для работы на природном газе, мазуте и кузнечком тощем угле с жидким шлакоудалением. Концентрация оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) при работе на угле находится на уровне 1600–1800 мг/м<sup>3</sup>, что превышает нормативную концентрацию 700 мг/м<sup>3</sup> [1], а стабильное горение факела необходимо поддерживать его подсветкой природным газом. С учетом вводимого нового законодательства в области экологии, ужесточающего требования по выбросам вредных веществ и стимулирующего применение наилучших доступных технологий (НДТ), плата станции за выбросы вредных веществ возрастет. При этом поверхности нагрева топочных камер этих котлов выработали свой рабочий ресурс.

Таким образом, для котлов ТПП-210А требуется провести замену топочных экранов с разработкой оптимальных схем сжигания кузнечного тощего угля с применением НДТ, которые смогли бы обеспечить надежную работу топочной камеры и снизить образование  $\text{NO}_x$ .

На кафедре ТЭС планируется разработать оптимальные схемы сжигания кузнечного тощего угля и других видов топлива на ТПП-210А с переводом на режим твердого шлакоудаления с применением прямоточных горелочных устройств и сопел, что позволит снизить концентрацию  $\text{NO}_x$  до 350 мг/м<sup>3</sup>, повысить надежность работы топочной камеры без подсветки факела высокорекреационным топливом. Экраны топочной камеры планируется заменить на современные газоплотные. Разработка схем будет проведена с помощью современных программ вычислительной гидродинамики, в основу которых положен метод конечных элементов с основными уравнениями гидродинамики, а также дополняющими их уравнениями, выбираемыми в зависимости от поставленной задачи [2]. Стоит отметить, что кафедра ТЭС имеет большой успешный опыт выполнения подобного рода работы.

### **Литература**

1. **ГОСТ Р 50831–95.** Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996.
2. **Chung T.J.** Computational fluid dynamics. Cambridge university press, 2002.

*Т.Ю. Чеснокова, О.И. Юдина, студенты;  
рук. Н.А. Еремина, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КИСЛОТНЫХ ОСАДКОВ В ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Для охраны окружающей среды большое значение имеет решение проблемы кислотных осадков. В соответствии с ГОСТ 17.2.1.03–84 такими считаются осадки с рН менее 5,6.

Основными загрязнителями воздушного бассейна Ивановской области являются предприятия теплоэнергетики, такие как Ивановский филиал ОАО «ТГК-6», ОАО «Техуллерод и резина», выбросы от которых составляют более 50 % всех выбросов от стационарных источников. Также существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха области вносят ООО «Эггер-Древпродукт» (Шуйский район), ОАО «Автокран» (г. Иваново), предприятия жилищно-коммунального хозяйства, имеющие на своем балансе крупные котельные, отапливающие населенные пункты [1].

В ходе учебных исследовательских работ в 2013–2014 г. авторами были проведены анализы рН снега на территории, прилегающей к корпусу «В» ИГЭУ, почвы с этой же территории и воды из рек Харинка (г. Иваново) и Ухтоhma (г. Комсомольск) после интенсивных дождей, а также самого дождя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что атмосферные осадки, выпавшие прошедшей зимой, можно отнести к кислотным, так как они имеют рН = (4,2–4,5). Это связано с тем, что количество атмосферных осадков этой зимой было очень малó, а предприятия работали в обычном режиме. Поэтому накопившиеся кислые газы растворялись в меньшем, чем обычно, количестве атмосферной влаги. Величина рН пробы снега с обочины дороги имеет щелочной характер за счет применения антигололедных реагентов. Пробы воды, взятые в мае из р. Ухтоhma, свидетельствуют о подкислении воды в реке (рН = 6,48). Это может быть связано с работой близлежащего предприятия ОАО «Ивановские ПГУ». Проба почвы имеет нейтральную величину рН (рН = 7,02).

Анализ проб, взятых в сентябре, показывает, что в водные объекты и в почвы в начале осени не попадали кислые осадки [рН = (7,02–7,73)]. Это может быть связано и с периодическими дождями, которые «промыли» атмосферный воздух летом, и с отсутствием выбросов от малых предприятий энергетики – котельных, и малыми выбросами городских ТЭЦ, так как еще не начался отопительный период.

### **Литература**

1. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Ивановской области в 2011 году». URL: <http://www.ecoindustry.ru/gosdoklad/view.234.htm/>

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Предложена методика оценки сравнительной эффективности оборудования, учитывающая расширенную совокупность характеристик работы котельных установок с применением метода многокритериального оценивания DEA – «Анализ среды функционирования» [1]. Сравнительная эффективность формируется как отношение аддитивного набора взвешенных значений выходных факторов (показателей производства) к взвешенным значениям входных величин – затратам ресурсов.

Сформулируем задачу математического программирования для исследуемых многомерных объектов – совокупности однотипных котлов. На основе методики иерархического оценивания эффективности объекта [2] определим характеристики объектов, наиболее влияющие на комплексную эффективность, и выделим частные критерии эффективности работы котлов, затем сгруппируем их и сформируем обобщенные показатели эффективности, характеризующие экономичность, экологичность и технологию. Далее составим глобальный критерий эффективности сравнительной совокупности объектов (1), который является комбинацией обобщенных критериев эффективности:

$$f = \max_{a_j b_j c_j d_j \in G} \left[ \frac{a_{1n} \eta_n}{b_{1n} G_{\text{топл}} + b_{2n} \mathcal{E}_{\text{тд}}} + \frac{1}{c_{1n} t_{\text{yx}n} + c_{2n} \Delta P_n} + \frac{1}{d_{1n} V_{n\text{NO}_x} + d_{2n} V_{n\text{CO}} + d_{3n} V_{n\text{CO}_2}} \right], \quad (1)$$

где  $n$  – количество объектов;  $a_{in}$ ,  $b_{jn}$ ,  $c_{jn}$ ,  $d_{jn}$  – весовые коэффициенты.

Таким образом, глобальный критерий характеризует комплексную оценку в качестве работы оборудования по совокупности всех частных критериев – параметров работы котлов. Методика позволит оптимизировать выбор режимов эксплуатации котлов с учетом их фактического состояния.

### Литература

1. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара: ООО «Офорт», 2005.
2. Посашков М.В., Салов А.Г., Немченко В.И. Реинжиниринг структуры управления газораспределительной организации // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 1.

*С.В. Шумов, К.С. Фоменко, студенты; рук. В.Б. Тупов, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ОТ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ**

Энергетическое оборудование ТЭЦ является сильным источником шума для окружающего района. Нормальная эксплуатация этого оборудования может являться причиной превышения санитарных норм в окружающем районе. Особенно это актуально для ТЭЦ, которые находятся внутри городов. Энергетические объекты должны иметь санитарно-защитную зону, в том числе и по фактору шума, которая должна обосновываться акустическими расчетами [1]. При анализе выясняется, что выполнение акустических расчетов для таких энергетических объектов как ТЭЦ бывает затруднительно.

Акустический расчет включает в себя:

- выявление источников шума и определение их шумовых характеристик;
- выбор точек, для которых проводится расчет;
- определение влияния элементов окружающей среды на распространение звука;
- сопоставление результатов расчета с допустимыми уровнями звукового давления в окружающем районе.

Особенностью расчета уровня шума от ТЭЦ является большое количество разнотипного оборудования, которое находится на большой территории, а также сложностью как учета снижения уровня шума за счет различных сооружений на территории ТЭЦ, так и увеличения уровня шума за счет отражения от них.

Поэтому целесообразно проводить акустические расчеты по определению санитарно-защитной зоны по фактору шума с помощью специализированных программ. Одной из таких программ является программа «Predictor», разработанная фирмой «SoftNoise» (Германия-Голландия). Данная программа проводит расчет в соответствии с международным стандартом ISO 9613-2:1993, аналогом которого является ГОСТ 31295.2–2005 [2]. Сравнение результатов расчетов по этой программе с результатами измерений дает удовлетворительное соответствие.

### **Литература**

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

*Д.А. Юпатов, студ.; рук-ли В.Б. Прохоров, к.т.н., проф.;*  
*И.В. Григорьев, асс. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОСНОВАНИЯ К ПОВЫШЕНИЮ ДОЛИ УГЛЯ НА ТЭС**

В последние годы газ заметно дорожает относительно угля. Такое изменение цен на топливо можно объяснить следующим: цена на природный газ подвергается государственному регулированию, и длительное время рост цены на природный газ сдерживался государством. В последние годы государство постепенно снижает свое влияние на цену природного газа, а сверхлимитный природный газ уже сейчас покупается на торгах. Это подтверждается динамикой изменения цен на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго».

Среднегодовая цена природного газа: 2000 г. – 336,17 руб/т у.т.; 2001 г. – 432,96 руб/т у.т.; 2005 г. – 1071,60 руб/т у.т.; 2012 г. – 3169,11 руб/т у.т.; 2013 г. – 4052,01 руб/т у.т.; 2014 г. – 4028,20 руб/т у.т. Среднегодовая цена угля: 2001 г. – 703,82 руб/т у.т.; 2005 г. – 1374,55 руб/т у.т.; 2012 г. – 2679,98 руб/т у.т.; 2013 г. – 2991,59 руб/т у.т.; 2014 г. – 2939,39 руб/т у.т. При такой динамике роста цен на топливо по прогнозу на 2020 г. среднегодовая цена природного газа составит 7500 руб/т у.т., а цена угля – 4100 руб/т у.т. [1].

В связи с этим фактом просматривается тенденция к росту сжигания угля на ТЭС. Но при увеличении доли угля появляются ограничения: высокие удельные выбросы оксидов азота, значительное заполнение золошлакоотвала и малое использование золы в народном хозяйстве. По этим причинам переход на сухие технологии удаления золы и шлака становится актуальным [2].

По предварительным прогнозам перевод котлов ТПП-210А ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» на сжигание топлива в прямоточно-вихревом факеле с реализацией системы ТШУ позволит обеспечить нормативные концентрации оксидов азота в дымовых газах. Переход к сухому удалению золы и шлака открывает гораздо больше вариантов для реализации золошлаковых материалов, чем при существующей системе ГЗУ, что будет способствовать реализации большего количества ЗШМ и приведет к уменьшению заполнения золошлакоотвала [1]. После технического перевооружения прогнозируется увеличение доли сжигаемого угля на ТЭЦ-22 в 4 раза [1].

### **Литература**

1. **Разработка** технических решений для перевода ТЭЦ-22 на максимальное сжигание угля / А.М. Архипов, В.Б. Прохоров и др. Отчет о НИР. МЭИ, 2014.
2. **Материалы V** Международной конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 24–25 апреля 2014 г. М.: Издательство МЭИ, 2014.

## Секция 44

# ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЭС И АЭС

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

*Секретарь секции — вед. инж. А.В. Очков*

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

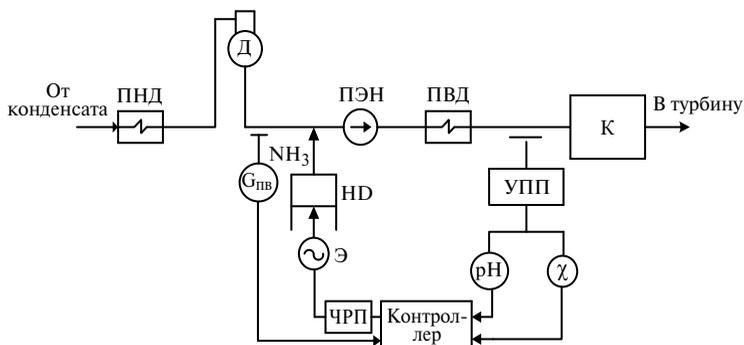
## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДОЗИРОВАНИЯ АММИАКА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

На ТЭС зачастую используются системы дозирования реагентов «вручную» или дозирование осуществляется только по теплотехническому параметру, как правило, по расходу теплоносителя. В связи с этим повышенный интерес оперативного персонала ТЭС вызывает создание систем автоматического дозирования с учетом параметров химического контроля [1]. В качестве примера можно привести автоматическую систему дозирования корректирующего реагента с компенсацией возмущения по теплотехническому параметру, в частности по расходу теплоносителя, как показано на рис. 1.

Ввод аммиака осуществляется насосом-дозатором, который управляется контроллером, получающим два аналоговых сигнала и выходной сигнал, поступающий на частотный преобразователь. Автоматическое дозирование аммиака в питательный тракт выполняется по сигналу удельной электропроводности питательной воды с коррекцией по значению рН. Применение параметра удельной электропроводности повышает надежность системы, поскольку техника измерения более проста и надежна, чем техника измерения рН.

При организации автоматического дозирования аммиака необходимо предусматривать автоматический контроль величин удельной электропроводности и рН обрабатываемой воды.

Обычно доза аммиака устанавливается в процессе наладки исходя из условия отсутствия в обрабатываемой среде углекислоты. Автоматическая система подачи аммиака может быть выполнена при условии отсутствия  $\text{CO}_2$ , но в этом случае система не сможет обеспечить необходимую норму аммиака для поддержания заданного значения рН.



**Рис. 1. Технологическая схема автоматического дозирования аммиака:**  
 Э – электродвигатель насоса-дозатора; ЧРП – частотный преобразователь;  
 УПП – устройство подготовки пробы

### Литература

1. Егошина О.В., Воронов В.Н., Назаренко П.Н. Разработка автоматического регулирования дозирования гидразина в СХТМ // Теплоэнергетика. 2007. № 7. С. 25–27.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДОЗИРОВАНИЯ ЭТАНОЛАМИНА ВО ВТОРОЙ КОНТУР АЭС С ВВЭР-1000

При существующих ВХР на атомных электростанциях дозирование этаноламина осуществляется во второй контур. На атомных станциях с ВВЭР-1000 поддержание необходимой концентрации этаноламина осуществляется ходом плунжера насоса-дозатора без учета концентрации этаноламина в исходном растворе. Поэтому было решено провести исследование по изучению определения концентрации этаноламина по косвенным показателям (рН и электропроводность) [1, 2]. Полученные данные, представленные на рис. 1, позволяют оценить концентрацию данного вещества по значению рН.

Таким образом, по показаниям рН можно составить схему автоматического контроля за дозированием этаноламина.

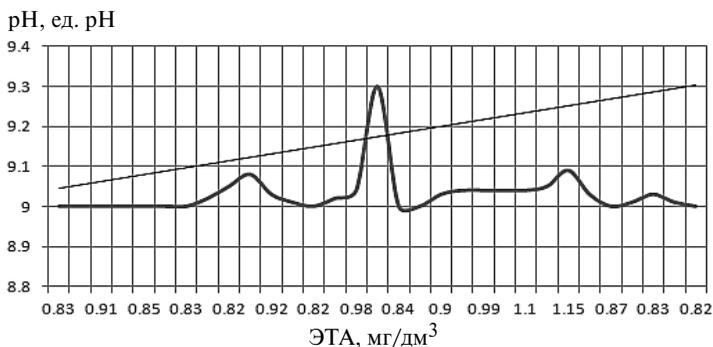


Рис. 1. Изменение значения рН от концентрации этаноламина в питательной воде

### Литература

1. Бухаров Д.Г., Зонов А.А., Шавыкин А.В. Промышленный бесконтактный кондуктометр ИТ-2201 для контроля электрической проводимости теплоносителя // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 12.
2. Исследование влияния концентрации фосфатов в котловой воде на электропроводность и рН / Т.И. Петрова, В.И. Кашинский, А.Е. Верховский и др.// Теплоэнергетика. 2007. № 7.

*А.Ю. Будаева, студ.; рук. Н.А. Ерёмкина, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ ВОД УСТАНОВОК ХИМИЧЕСКОГО ОБЕССОЛИВАНИЯ ДОБАВОЧНОЙ ВОДЫ НА ТЭС**

Стоки химического цеха тепловой электростанции в значительной степени формируются водами взрыхляющих промывок, отработанными регенерационными растворами и отмывочными водами ионитных фильтров [1]. Обычно перед сбросом в природные водоемы стоки химцеха смешиваются с общестанционным стоком, что позволяет снизить концентрации солей, однако, общий солевой сброс может превышать ПДК и вызывать штрафные санкции со стороны контролирурующих органов.

Экологические проблемы химводоочисток ТЭС являются одним из основных аргументов в пользу применения мембранных технологий водоподготовки взамен ионитных фильтров [2].

В данной работе предлагается простой метод сокращения объема минерализованных сточных вод обессоливающей установки на основе использования измерений электропроводности с последующей отдельной утилизацией условно чистого и минерализованного стоков.

В качестве примера рассмотрена установка химического обессоливания Костромской ГРЭС (КГРЭС).

Было проведено технологическое испытание оборудования обессоливающей установки КГРЭС, в ходе которого получены выходные кривые регенерации катионитных и анионитных фильтров первого блока фильтров.

Для уменьшения расхода воды на собственные нужды установки на КГРЭС предусмотрен отвод от фильтров вод взрыхляющей промывки в бак промстоков с последующей очисткой и возвратом в технологический цикл.

Таким образом, под контролем электропроводности стоков регенерации ионитных фильтров обессоливающей установки с блочным включением (КГРЭС) возможна отдельная утилизация маломинерализованных (возвращаются в технологический цикл) и высокоминерализованных (упариваются до увлажненных солевых остатков, пригодных к вывозу с ТЭС) регенерационных вод.

### **Литература**

1. **Правила** охраны поверхностных вод (типовые положения). М.: Государственный комитет СССР по охране природы, 1991.
2. **Стратегия** защиты водоемов от сброса сточных вод ТЭС ОАО «Мосэнерго» / Н.И. Серебрянников, Г.В. Преснов, А.М. Храмчихин и др. // Теплоэнергетика. 1998. № 7.

## **РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «УСТАНОВКА ОБРАТНОГО ОСМОСА И ХИМИЧЕСКОГО ОБЕССОЛИВАНИЯ»**

Одним из перспективных направлений для ВПУ ТЭС и АЭС является применение технологий мембранной обработки для подготовки воды в соответствии с повышенными требованиями к нормам качества водного теплоносителя. Как правило, эта технология включает в себя очистку воды на установках обратного осмоса и ультрафильтрации [1].

На кафедре ХХТЭ ИГЭУ было поставлено оборудование для стенда, моделирующего мембранную очистку воды методом обратного осмоса и химическую очистку методом ионного обмена. Студентами и магистрами кафедры под руководством преподавателей был смонтирован и подготовлен для ввода в учебный процесс стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания». В часть установки обратного осмоса входит насос, который питает водой исходного качества всю установку, угольный механический фильтр, предназначенный для очистки воды от коллоидных примесей и взвешенных веществ; мембранный фильтр; служащий для задержки молекул и ионов растворенных веществ на полупроницаемой мембране; напорный бак и мембранный клапан, необходимые для запаса и питания дальнейших элементов химической очистки водой, прошедшей мембранный фильтр; карбоновый фильтр, который служит последней ступенью очистки. В часть установки химического обессоливания входит насос, угольный механический фильтр и две колонки, заполненные Н-катионитным и ОН-анионитным ионообменными материалами, которые служат для очистки воды с помощью обмена между ионами, входящими в состав воды, и ионами функциональных групп, входящих в состав ионитов. По ходу движения обрабатываемой воды стенд оснащен задвижками, предназначенными для смены режимов работы установки и для отбора проб воды после каждого элемента очистки для дальнейшего лабораторного анализа.

Таким образом, для студентов старших курсов существует возможность натурального изучения технологий обессоливания воды по методам химического обессоливания и обратноосмотической очистки.

### **Литература**

1. **Технологии** мембранного разделения в промышленной водоподготовке / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий и др. М.: ДеЛи плюс, 2012.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕСКИСЛОРОЖИВАНИЯ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИТА И БИСУЛЬФИТА НАТРИЯ**

Обескислороживание воды является одним из основных этапов подготовки подпиточной воды для теплосетей и питательной воды для паровых котлов. Традиционно обескислороживание осуществляется в деаэраторах различного рабочего давления, однако для большинства существующих котельных систем теплоснабжения установка деаэратора не была предусмотрена проектом. В связи с повышением требований к надежности эксплуатации энергетического оборудования теплосетей проблема обескислороживания является актуальной.

В отсутствие деаэратора для обескислороживания воды и предотвращения кислородной коррозии в настоящее время все чаще применяют коррекционные методы подготовки воды с использованием химических реагентов. В энергетике хорошо известен метод сульфитирования, в основе которого лежит процесс связывания остаточного кислорода сульфитом натрия. Сульфит натрия в основном используется для дообескислороживания питательной воды паровых котлов низкого и среднего давления (для давлений ниже 4,0 МПа) [1].

В качестве аналога сульфита натрия специалистами «НФП Траверс» был разработан реагент на основе бисульфата натрия. Данный реагент имеет большую растворимость, нежели сульфит натрия, лучшую транспортабельность. Однако водный раствор бисульфита натрия характеризуется низким значением рН (4,0–5,0), поэтому дополнительным фактором, влияющим на эффективность реагента, будет являться не только щелочность, но значение рН обработанной и обрабатываемой воды.

В данной работе автором были проведены исследования по сопоставлению эффективности процесса обескислороживания с использованием реагента на основе сульфита и бисульфита натрия. Исследования проводились на лабораторной модельной установке.

В связи с разнообразием исходных вод, используемых в системах теплоснабжения, и различными температурными условиями применения химических реагентов для коррекционной обработки воды исследования, проведенные автором, имеют важное практическое значение.

### **Литература**

1. **Субботина Н.П.** Водный режим и химический контроль на ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1985.

*А.В. Гайнетдинов, Р.Р. Шакиров, студенты;  
рук. Э.А. Ахметов, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)*

## **ГАЗИФИКАЦИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ**

В начале 2012 года Правительством РФ была утверждена Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. Она предусматривает осуществление процессов, способствующих понижению себестоимости и повышению спроса на угольное топливо.

Как показано в работе [1], в энергетике РФ уменьшается потребление угля. Это в большей степени связано с наличием в России больших запасов относительно недорогого природного газа, а также его более простой транспортировкой и менее экологически вредным сжиганием. Происходит перевооружение электростанций на паротурбинные, газотурбинные и газопоршневые технологии, использующие этот вид топлива в качестве основного. Переход на газовое топливо несет за собой ряд последствий, отрицательно влияющих на планомерное повышение добычи энергетического угля.

За последнее десятилетие появилось множество публикаций на тему развития технологий транспортировки, переработки и способов сжигания каменного угля, позволяющих повысить перспективность его применения в качестве основного вида топлива в нашей стране.

Одним из перспективных методов переработки угля является газификация, которая позволяет получить горючий газ и полукокс.

Современные методы газификации в генераторах кипящего слоя с применением паровоздушного и кислородного дутья, высокотемпературным жидким шлакоудалением значительно снижают выбросы окислов серы и азота в атмосферу, уменьшают количество смолы и непрореагировавших частиц угля в газе, что в свою очередь способствует повышению экологической эффективности сжигания топлива на десятки процентов [2].

Выбор метода газификации необходимо осуществлять на основе множества критериев и расчетов, которые позволяют получить максимальное количество энергии при минимуме финансовых затрат и отсутствии сильного воздействия на окружающую среду.

### **Литература**

1. **Изыгзон Н.Б.** Реализуема ли программа 2030? // Уголь. 2012. № 1.
2. **Латышев В.П., Мельник С.М.** Разработка экологически чистого и энергосберегающего метода газификации углей // Вестник российского университета дружбы народов. 2004. № 1.

## **ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В БАКЕ АТМОСФЕРНОГО ДЕАЭРАТОРА НА КИНЕТИКУ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРОКАРБОНАТОВ**

Рассматривается процесс термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе, включающий последовательно протекающие стадии: химическую, молекулярной диффузии и дисперсного выделения газа.

Время пребывания воды в деаэрационной колонке невелико, поэтому практически вся нагрузка по хемосорбции диоксида углерода приходится на деаэрационный бак. Поскольку температура в баке при эксплуатации мало отличается от температуры насыщения, скорость генерации диоксида углерода в ходе химической стадии процесса определяется порядком реакции. Скорость последующих стадий (диффузии и дисперсии) зависима от гидродинамической обстановки в системе. В общем случае можно моделировать итоговый процесс как реакцию первого или второго порядка.

Имеются экспериментальные данные по ряду деаэраторов разной конструкции, позволяющие рассчитать при условиях каждого опыта значения константы скорости реакции (полагая, что это значение относится не к химической стадии как таковой, а к процессу в целом, т. е. с учетом гидродинамической обстановки). Если при этом использовать среднее время пребывания воды в деаэраторе, рассчитываемое как время вытеснения, полученные массивы значений для констант скорости реакции характеризуются существенным разбросом относительно среднего (около 50 %).

В работе выдвинута гипотеза, что наблюдаемый разброс обусловлен влиянием гидродинамической обстановки в системе: каждый элементарный объем воды присутствует в баке не одинаковое время. Если применить кинетическое уравнение реакции к каждому из выделенных малых объемов воды и считать щелочность потока деаэрированной воды по уравнению смешения этих малых струек, то для каждого опыта можно подобрать новое значение константы скорости реакции.

Расчеты проведены с использованием прикладного программного комплекса FlowVision. В результате удалось уменьшить разброс значений констант скорости реакции до 20 % и статистически доказать гипотезу о смене механизма процесса при общей щелочности воды около  $2,4 \text{ мг-экв/дм}^3$ . Полученные результаты способствуют повышению точности прогнозирования эффективности декарбонизации воды в деаэраторах и необходимы при их проектировании и наладке.

*Ф.В. Дяченко, Ю.В. Богатырёва, аспиранты; А.К. Бородастов, студ.;  
рук. А.П. Пильщиков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВЛИЯНИЕ РЕАГЕНТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИАМИНЫ, НА ОБМЕННУЮ ЕМКОСТЬ ИОНИТОВ**

В последние годы довольно широкое применение в энергетике находят комплексные реагенты, содержащие пленкообразующие соединения. 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. К сожалению, состав комплексных реагентов фирмами-изготовителями держится в секрете.

Наличие комплексных реагентов в конденсате может влиять на работу фильтров конденсатоочистки, однако данные об этом практически отсутствуют.

Проведены исследования, основной целью которых было изучение влияния соединений, содержащихся в комплексных реагентах на работу катионита и анионита при многократном использовании на примере широко используемого реагента «Хеламина» марки 906Н. Опыты проводились на экспериментальной установке в лаборатории ТВТ МЭИ и на ТЭЦ, где для коррекции ВХР применяется «Хеламин».

При проведении исследований на кафедре ТВТ МЭИ использовался раствор, содержащий  $\text{CaCl}_2$  и «Хеламин» марки 906Н. Опыты показали, что обменная емкость катионита КУ-2-8 в Н-форме и анионита Amberlite IRA 900 Cl в ОН-форме практически не изменяется при повторном использовании этих ионитов для обработки воды, содержащей «Хеламин» марки 906Н и практически не отличается от обменной емкости при фильтровании воды, не содержащей этого реагента.

В связи с тем, что при работе энергетического оборудования возможно изменение компонентного состава реагента под воздействием температуры, были проведены испытания работы ионитных фильтров на тепловой электростанции, на которой для коррекции ВХР используется «Хеламин».

Обработка турбинного конденсата проводилась по схеме Н-катионитный фильтр = ОН-анионитный фильтр. Фильтры были загружены соответственно катионитом КУ-2-8 в Н-форме и анионитом Amberlite IRA 900 Cl в ОН-форме. В процессе испытаний измерялась удельная электропроводность и концентрация общего органического углерода в фильтрате после каждого из фильтров.

Проведенные в промышленных условиях испытания показали, что использование Н-ОН фильтров в системе конденсатоочистки позволяет снизить концентрацию примесей в конденсате и уменьшить содержание органических примесей.

*А.К. Колодяжный, асп.; рук. В.Ф. Очков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **О ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА (СЭНМ) В ХИМИЧЕСКИХ ЦЕХАХ ТЕПЛОВЫХ СТАНЦИЙ КАК НЕОТЪЕМЛЕМОМ ТРЕБОВАНИИ СОВРЕМЕННОГО КОНКУРЕНТНОГО РЫНКА**

Химический цех как структурное подразделение электрических станций является, безусловно, одним из основных частей, входящих в контуры СЭНМ всей производственной площадки, как по значимости выполняемых технологических операций, так и по степени потребления энергетических ресурсов (электрическая энергия, вода, сжатый воздух и другие аналогичные субстанции), тем самым, обладая значительным потенциалом для снижения потребления энергоносителей на единицу выпускаемой продукции (1 м<sup>3</sup> обессоленной / умягченной воды для подпитки котлов / теплосети).

Вода и топливо – тот незыблемый базис, который в полной мере отражает предмет деятельности химических служб электростанций.

Понятие энергетического менеджмента – синоним управления энерго-ресурсопотреблением с индикацией конкретных целей и задач каждой производственной единицы [1].

Все те явления и преобразования, присущие отрасли в последние годы, характеризуются как смена энергетической парадигмы.

Именно переход работы энергокомпаний на коммерческие рельсы диктует менеджменту проведение жесткого курса на дальнейшее развитие предприятия, ломая стереотипы и внедряя передовой мировой опыт.

Осуществление интеграции лучших практик, одной из которых является внедрение СЭНМ, целесообразно начинать с наиболее мелких производственных ячеек – цехов (в частности, химических в нашем случае).

Это шаг, позволяющий добиться синергетического эффекта: повысить эффективность всей технологической цепочки и снизить операционные затраты путем оптимизации численности оперативного и инженерно-технического персонала.

### **Литература**

1. **ISO 50001:2011.** Системы энергетического менеджмента // Требования и руководство по их применению: пер. В.А. Качалова.

*М.А. Кондратьева, асп.; рук. К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ PRESSURE RETARDED OSMOSIS В КАЧЕСТВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ**

Одной из актуальных задач, связанных с энергосбережением и сохранением окружающей среды – это использование градиента солености для выработки электричества. Для этого можно использовать несколько вариантов мембранных технологий: прямой осмос (в англоязычной литературе Forward Osmosis, сокращенно FO), обратный электродиализ (Reverse ElectroDialysis, сокращенно RED) и PRO (Pressure Retarded Osmosis), основополагающие принципы работы которых приведены в [1]. Каждая технология имеет свои недостатки: в технологии RED при высоких плотностях тока происходит разложение воды, а с ростом степени обессоливания воды повышается электрическое сопротивление в камерах. При FO сильно снижается производительность за счет концентрационной поляризации по сравнению с остальными технологиями. В связи с этим практический интерес представляет технология PRO [2].

Настоящая работа посвящена анализу работы первой в мире опытной электростанции, построенной в Норвегии [3] по технологии PRO, информация о технических характеристиках которой отсутствует.

В результате расчетов получена оценка реализованного на станции рабочего давления 11–12,5 атм. При этом производимая мощность составила 10 кВт. Учитывая мощность, вырабатываемую турбиной, которая складывается из мощности, потребляемой станцией на собственные нужды и мощности, отдаваемой в сеть, в работе проведена оценка текущей эффективности осмотической станции, которая составила 30 %, что сопоставимо с имеющимися в литературе данными о мощности станции чуть выше 2 кВт.

По результатам исследований также сделан вывод, что эффективность работы электростанции по технологии PRO можно повысить на основании следующих критериев:

- более энергоэффективных методов подготовки воды;
- уменьшения затрат энергии на собственные нужды;
- усовершенствования характеристик мембран.

### **Литература**

1. **Loeb S.** Osmotic power plants // *Journal of Membrane Science*. 1975. No 189.
2. **Achilli Andrea.** Power generation with pressure retarded osmosis: an experimental and theoretical investigation // *Journal of Membrane Science*. 2009. No 343.
3. **Patel S.** Norway inaugurates osmotic power plant. *Power* 154, 2010.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ СИСТЕМЫ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Предлагаемая работа предназначена для оперативного мониторинга водно-химического режима ТЭС и АЭС, использующих анализаторы химического контроля, с целью обеспечения надежной эксплуатации систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) для предотвращения возможных аварийных ситуаций, связанных с нарушением ведения ВХР и изменением теплотехнических параметров на энергетическом оборудовании [1].

Исследование динамических характеристик автоматических анализаторов химического контроля и моделирование переходных процессов было проведено на кафедре технологии воды и топлива НИУ «МЭИ» на экспериментальном стенде, моделирующем работу СХТМ. Во время проведения эксперимента с целью снятия кривых разгона анализаторов были смоделированы основные виды возмущений: изменение расхода, ухудшение качества, резкое увеличение температуры анализируемой среды, встречающиеся в системах химико-технологического мониторинга на реальных энергетических объектах.

В результате расчета определены следующие динамические характеристики анализаторов химического контроля: постоянная времени, характеризующая скорость изменения показателей (УЭП, рН и Na) при нанесении возмущения, время, за которое параметр химического контроля достигнет установившегося значения после возникновения нарушения ВХР и др. [2].

Полученные результаты эксперимента свидетельствуют о существенном влиянии основных типов нарушений водных режимов на динамические свойства анализаторов химического контроля. Поэтому необходимо учитывать изменение динамических свойств анализаторов в случае использования их в автоматическом химконтроле, в особенности в автоматических системах дозирования реагентов в тракт энергоблока на ТЭС и АЭС.

### **Литература**

1. **Егошина О.В., Воронов В.Н., Назаренко М.П.** Современное состояние систем химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях на основе опыта МЭИ – НПЦ «Элемент» // Теплоэнергетика. 2014. № 3.
2. **Живилова Л.М., Слободская Ю.А.** Автоматические анализаторы показателей качества ВХР пароводяного тракта и сточных вод ТЭС // НРЭ. 2008. № 8.

*А.И. Минибаев, студ.; С.М. Власов, асп.;  
рук. Н.Д. Чичирова, д.х.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)*

## **РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОМЕМБРАНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ**

В настоящее время существует большой выбор технологий, позволяющих эффективно очищать воду любого качества с высоким содержанием и с большим количеством взвеси.

Одним из перспективных направлений технологического совершенствования водоподготовительных установок тепловых электрических станций России является промышленное освоение мембранных технологий, которые позволяют эффективно и экономично разделять вещества самой различной природы и степени дисперсности как в жидкой, так и в газовой средах [1].

В мире электромембранные технологии доказали свое преимущество по сравнению с традиционными технологиями очистки, разделения, обессоливания и концентрирования жидких смесей. Благодаря их развитию были достигнуты значительные технические и коммерческие успехи.

Применение электромембранных процессов для решения разнообразных научно-технических задач демонстрирует экономическую выгоду и экологическую чистоту электромембранных производств [1].

Электромембранные технологии причисляются к технологиям будущего: энерго- и ресурсосберегающим, экологически чистым. Уже сегодня на их основе решаются многие крупномасштабные проблемы:

- обессоливание высокоминерализованных и солоноватых вод, опреснение морской воды;
- подготовка хозяйственно-питьевой воды для нужд населения;
- водоподготовка для различных отраслей промышленности;
- разделение и концентрирование различных растворов (получение кислот и щелочей из растворов соответствующих солей).

Актуальность использования электромембранной технологии обессоливания воды для нужд водоподготовки на ТЭС и АЭС обусловлена возможностью практически безреагентного удаления из воды растворенных в ней солей и органических соединений [2].

### **Литература**

1. **Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Вафин Т.Ф.** Электромембранные технологии в энергетике. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012.
2. **Юрчевский Е.Б., Первов А.Г., Адрианов А.П.** Перспективы использования мембранных технологий водоподготовки для предотвращения загрязнения пароводяных трактов ТЭС органическими примесями природной воды // Теплоэнергетика. 2006. № 8.

*Е.К. Мусатаев, студ.; рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц.  
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛИГНИТОВ ГОРНОСТАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Многочисленные исследования, выполненные за последние годы, показывают, что спрос на уголь будет неуклонно расти на протяжении будущих нескольких десятков лет. Поэтому большее значение приобретает ориентация теплоэнергетики на использование дешевых и легкодоступных низкосортных местных топлив [1].

Запасы угля в мире существенно выше, чем нефти и газа, поэтому необходимо стимулировать работы по исследованию в области угольной промышленности.

Целью работы являются изучение и энергетический анализ качественных характеристик лигнитов Горностаевского месторождения Восточно-Казахстанской области (ВКО).

Горностаевское месторождение лигнитов расположено в Восточно-Казахстанской области в 100 км западнее г. Семей на трассе железной дороги г. Семей – г. Павлодар. В районе месторождения есть вся необходимая для ведения разведочных работ инфраструктура [1].

В результате проделанной работы были получены следующие выводы:

- Горностаевское месторождение располагается в удобном месте для добычи полезных ископаемых, в частности лигнитов, из-за близкого расположения железных дорог и трасс республиканского значения;
- так как лигниты являются попутным полезным ископаемым к кобальто-никелевым рудам, их добыча вполне выгодна;
- при исследовании проб лигнитов получены их качественные характеристики и состав: углерод 59,83 %, водород 7,75 %, азот 0,58 %, кислород 27,6 %, сера 4,23 %;
- исследование лигнитов показали, что они пригодны для сжигания в котельных малых мощностей.

### **Литература**

1. **Протокол** заседания технического Совета Казахстанского территориального управления геологии и недропользования от 04.07.2007 г. № 323.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

В работе рассмотрены проблемы при организации систем контроля и управления коррекционными режимами для парогазовых установок на ТЭС. Данная проблематика недостаточно изучена в литературе, что вызывает необходимость проведения исследования в этой области.

Для проведения исследований систем контроля и управления водным режимом необходимо составить математическую модель, которая должна полностью описывать все важнейшие свойства и характеристики системы. Математическая модель системы управления водным режимом может быть представлена в виде дифференциального уравнения, передаточной функции, переходной характеристики и т. д. [1, 2].

Основными целями данного исследования являются:

- 1) описание методов исследования систем контроля и управления водным режимом и их теоретическое обоснование;
- 2) экспериментальное исследование ожидаемых теоретических результатов в лабораторных условиях, позволяющей моделировать процессы, протекающие в пароводяном тракте тепловой электростанции;
- 3) адаптация систем контроля и управления водным режимом на экспериментальной установке к условиям, приближенным к реальным на ТЭС;
- 4) разработка рекомендаций по организации систем химического контроля и управления коррекционными режимами.

Результаты данной работы помогут оптимизировать работу систем контроля и управления водными режимами на тепловых электростанциях с блоками ПГУ, а также повысить уровень эксплуатации действующего энергетического оборудования.

### **Литература**

1. **Живилова Л.М., Максимов В.В.** Автоматизация водоподготовительных установок и управления водно-химическим режимом ТЭС. М.: МЭИ, 1986.
2. **Рогач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2008.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНСЕРВАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Коррозионная защита теплообменных поверхностей на электростанциях является актуальной проблемой. Для решения данной проблемы существуют различные методы консервации:

- пленкообразующий амин – октадециламин (ОДА);
- сухая консервация;
- образование защитной пленки с использованием реагентов консервации – гидразина, аммиака, трилона Б и др.

В лабораторных испытаниях было проведено сравнение эффективности двух видов консервации, а именно: сухой консервации и октадециламина (ОДА). На основе результатов сравнения экспериментальных данных [1, 2] можно предположить, что ОДА – наиболее эффективный способ. Он имеет высокую степень защиты от коррозии, что заключается в удалении хлоридов, снижении отложений и т.д. Кроме того, ОДА устраняет главный недостаток других методов. Использование октадециламина может обеспечить возможность защиты от атмосферной коррозии всего оборудования и трубопроводов пароводяного тракта электростанций.

### Литература

1. **Об основных** задачах исследований на крупномасштабной модели II контура АЭС с ВВЭР-1000: Годовой отчет ЭНИЦ ВНИИАЭС 2000 / В.А. Гашенко, А.В. Ульянов, А.Л. Тарасюк и др. Электрогорск: ЭНИЦ, 2001.
2. **Исследование** эффективности процедуры «сухой» консервации парогенератора ПГВ-1000М / В.С. Попадчук, Р.Ю. Жуков, А.В. Селезнев и др. // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы 5-й Международной научно-технической конференции, 29 мая – 1 июня 2007. Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007.

*И.А. Середягин, студ.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СХТМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПГУ**

В настоящее время очень распространенной проблемой является недооценка специалистами тепловых электростанций важности роли качества водно-химического режима и последствий от его нарушений [1].

Хорошо известно, что повреждаемость поверхностей нагрева складывается из следующих факторов: организации водно-химического режима, наличия автоматического химического контроля и контроля температуры металла, наличия отсутствия отложений на поверхностях нагрева и ряда других факторов [2].

На основании данных автоматического, лабораторного химического и теплотехнического контроля блока ПГУ мощностью 450 МВт ТЭЦ-27 «Мосэнерго» был проведен расчет повреждаемости оборудования.

В соответствии с индексом повреждаемости оборудования (ИПО) выполняется расчет повреждаемости оборудования:

$$ПО = ИПО \times 100/56,43, \quad (1)$$

где число 56,43 – максимальное значение ИПО.

Расчеты показали, что при наилучшем уровне эксплуатации оборудования и наилучшем качестве ведения ВХР повреждаемость оборудования составит 10,57 %.

С целью обеспечения наилучшего качества ведения водного режима на тепловых электростанциях внедряют системы химико-технологического мониторинга (СХТМ), в том числе на блоках ПГУ. Именно СХТМ отвечает за снижение повреждаемости оборудования, так как происходят сокращение количества отложений на поверхностях нагрева, оптимизация дозирования реагентов в тракт энергоблока.

### **Литература**

1. **Паули В.К.** Технология воды и надежность: Курс лекций. М.: Издательство МЭИ, 2000.
2. **Егошина О.В.** Инженерные расчеты в системах химико-технологического мониторинга. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

*А.Я. Сорокина, студ.; рук. А.Б. Ларин, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ПРИМЕСЕЙ ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Надежность, экономичность и безопасность работы энергоблоков ТЭС в значительной степени зависит от состояния водно-химического режима (ВХР), регулируемого правилами технической эксплуатации [1] и другими нормативными документами. Нарушения ВХР должны отслеживаться непрерывно приборами автоматического химического контроля (АХК) по всему пароводяному тракту энергоблока. Из приборов АХК кондуктометры и отчасти рН-метры, способны уверенно реагировать на нарушения на ранней стадии их развития. Различить отдельные виды нарушений ВХР по показателям основных приборов АХК – кондуктометров и рН-метров – можно, используя алгоритм расчета концентраций ионных компонентов питательной, котловой вод и их составляющих потоков.

В настоящее время все большее внимание уделяется качеству водного теплоносителя на ТЭС на базе барабанных котлов и котлов-утилизаторов ПГУ. В связи с повышением требований к качеству водного теплоносителя и ужесточению норм необходимо совершенствовать СХТМ на базе существующих приборов АХК. Появление на рынке высокотехнологичных приборов дает возможность измерения и расчета нескольких показателей качества при уменьшении количества устанавливаемых приборов.

Сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ совместно с НПП «Техноприбор» (Москва) разработан автоматический анализатор примесей водного теплоносителя на базе многоканального прибора «Лидер». Применение этого устройства для контроля качества воды и пара позволяет по двум измеренным показателям ( $\chi$ ,  $\chi_H$ ) рассчитать и вывести на экран следующие показатели: при аммиачном ВХР – хлориды, рН, аммиак и натрий условный; при безаммиачном ВХР – хлориды, рН и натрий условный.

В связи с этим установка данного прибора может осуществляться практически на любой энергоблок и позволяет измерить и рассчитать практически все требуемые характеристики качества питательной воды. Установка этого прибора на конденсат турбины также может позволить диагностировать присосы охлаждающей воды в конденсаторе.

При использовании данной расчетной методики и вводе концентраций аммиака в СХТМ возможно автоматическое регулирование дозирования аммиака в пароводяной тракт ТЭС.

### **Литература**

1. **СО 153-34.20.501–2003** (РД 34.20.501–95). Правила технической эксплуатации электрических станций и тепловых Российской Федерации. Утв. Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 19 июня 2003 г. № 229. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

*Е.А. Столярова, Р.Н. Зарипова, Е.А. Ульянова, студенты;  
рук-ли О.В. Егошина, к.т.н. доц.; Ю.А. Морыганова, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **РАСЧЕТ ИОННОГО СОСТАВА ОСВЕТЛЕННЫХ ВОД НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ**

Одной из основных задач химического контроля за качеством технологических вод на ТЭС является определение ионного состава очищаемых вод. Метод расчета состава воды по известному значению удельной электрической проводимости разработан автором работ [1, 2]. На основании данных работ был выполнен расчет ионного состава воды.

На кафедре ТЭС имеется установка автоматического химического контроля, на которой проведена серия измерений удельной электрической проводимости осветленной воды.

В результате эксперимента отобрана проба осветленной воды и определены показатели анализируемой среды. Жесткость, щелочность определены с помощью титриметрического метода. На основании полученных данных рассчитаны минерализация, мг-экв/л; концентрация сульфатов, мг/л. Искомая концентрация ионов натрия, мг/л, вычислена по формуле

$$[Na^+] = 23(\text{Щ}_0 + 0,028[Cl^-] + 0,028[SO_4^{2-}] - \text{Ж}_0). \quad (1)$$

В результате проведенного расчета определен ионный состав осветленной воды на основе автоматических измерений общей удельной электрической проводимости. Данная методика расчета концентрации натрия может быть полезна оперативному персоналу химических цехов с целью контроля качества технологических сред на водоподготовительных участках тепловых электростанций.

### **Литература**

1. **Ларин Б.М.** Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

2. **Ларин Б.М.** Расчет концентраций ионов по измеренной электропроводности растворов и природных вод / Б.М. Ларин, Н.Д. Купонская // Изв. вузов. Энергетика. 1986. № 10.

*Е.Г. Ухалова, студ.; рук. Е.В. Зайцева, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ТЭС**

Вредные выбросы в дымовых газах ТЭС при сжигании твердых топлив жестко регламентируются государственными стандартами [1].

Одним из основных загрязнителей атмосферы являются ТЭЦ. Главными проблемами при сжигании органического топлива является нанесение ущерба окружающей среде окислами азота, серы, золой. Уменьшение выбросов при сжигании твердого топлива – одна из важнейших экологических задач.

Существует ряд экологически безопасных технологий сжигания широкой гаммы твердых топлив, к таким эффективным технологиям относят:

1) технология сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) при атмосферном давлении.

Преимуществом сжигания твердого топлива в ЦКС является эффективное сжигание углей с высоким содержанием золы и влаги, а также труднозажигаемых топлив (с малым выходом летучих);

2) технология сжигания угля в вихревой топке.

Применение вихревой технологии обуславливает увеличение изменения: гаммы топлив в связи с бесшлаковочным сжиганием канско-ачинских углей в котлоагрегатах с вихревой топкой и жидким шлакоудалением, коэффициента готовности котлоагрегата из-за повышенного износа теплопринимающих поверхностей при вихревом сжигании твердого топлива, экологических параметров;

3) технология термopодготовки топлива.

Сущностью термической подготовки пылевидного топлива является предварительная частичная аллотермическая его газификация;

4) технология плазменного розжига и стабилизация горения основного факела.

В последнее время эта технология рассматривается и как средство снижения выбросов оксидов азота.

Таким образом, при сжигании твердого топлива с применением предлагаемых экологически безопасных технологий значительно уменьшаются технологические, экологические, экономические факторы, что позволяет обеспечить защиту окружающей среды от вредных выбросов.

### **Литература**

1. **ГОСТ Р 50831–95.** Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1995.

2. **Раяк М.Б., Бернер Г.Я., Кинкер М.Г.** Совершенствование процесса сжигания топлива. Обзор зарубежных технологий // Новости теплоснабжения. 2011. № 12 (135).

Чжо Ко Ко, асп.; рук. В.Ф. Очков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ОБЛАЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРИГЕНЕРАЦИИ

В работе затрагиваются две «модные» темы: *тригенерация* и *облачные компьютерные технологии*. Рассмотрено решение несложной гидродинамической задачи применительно к тепловой сети с использованием облачных функций по свойствам теплоносителя. Ключевые слова: тригенерация, теплофизические свойства теплоносителей, тепловая сеть [1].

Расчет процессов тригенерации (комплексного производства тепла, электроэнергии и холода) требует знания свойств рабочих тел, теплоносителей и конструкционных материалов, задействованных в этих процессах. Национальный исследовательский университет «МЭИ» ([www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)) совместно с Объединенным институтом высоких температур РАН ([www.jiht.ru](http://www.jiht.ru)) и внедренческой фирмой «Триеру» ([www.trie.ru](http://www.trie.ru)) предлагает расчетчикам новую технологию работы с базами данных по свойствам веществ, основанную на использовании так называемых *облачных функций*.

В настоящее время, работая по традиционной технологии, проектировщик при расчете процессов тригенерации или отдельных процессов производства тепла, электроэнергии или холода вынужден *обращаться* к бумажным или электронным источникам информации по свойствам рабочих тел, теплоносителей и материалов. Кроме того, проектировщик может работать с узкоспециализированными расчетными программами (САПР), в которые *вшиты* нужные свойства нужных веществ, или *подключать* к расчетам электронные базы данных. Технология использования облачных функций для расчетов лишена этих недостатков. Задача решалась не аналитически, а численными (приближенными) методами.

### Литература

1. **Очков В.Ф.** Теплотехнические этюды с Excel, MathCAD и Интернет. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. (URL: <http://tw.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html/>)

*Д.А. Шаповалов, асп.; рук. А.А. Пантелеев, д.ф.-м.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Установки обратного осмоса (УОО) находят применение во многих отраслях производства, где необходимо использование очищенной воды. Одним из главных преимуществ этой технологии является получение фильтрованной воды (пермеата) стабильного качества. Но существует ряд факторов, от которых зависят как выходные параметры работы оборудования, так и степень очистки. В данной работе было исследовано влияние одного из существенных показателей – это температура воды, поступающей на установку.

Исходная вода направляется на установку обратного осмоса с одной мембраной, предварительно пройдя систему предподготовки (механической фильтрации и умягчения). В УОО организован контур рециркуляции – возврат части концентрата на вход в установку [1]. Во время проведения экспериментов изучалось влияние температуры исходной воды, а также соотношение потоков фильтрата и концентрата на качество очищенной воды и производительность установки. В ходе проведенных испытаний были получены зависимости производительности установки, электропроводности фильтрата при различных значениях температуры исходной воды (нагрев воды проводился с помощью проточного нагревателя). Гидравлический КПД установки задавался при помощи регулирования потоков рециркуляции и концентрата [2]. Результаты опытов показывают, что изменение температуры (увеличение/снижение) относительно начальных настроек установки обратного осмоса приводит к изменению электропроводности до 50÷70 %, а производительности до 100÷130 %.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что для качественного проектирования и прогнозирования работы установки необходимо заранее указывать возможные перепады температуры исходной воды. Это существенно упростит эксплуатацию оборудования, а также обеспечит необходимое качество очищенной воды.

### **Литература**

1. **Мембранные** технологии в промышленной водоподготовке / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий и др. М.: ДеЛи плюс, 2012.
2. **Dow Chemical Corp.** Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual / Dow Water Solutions. Dow: Chemical, 2008.

*В.О. Яровой, асп., К.Е. Кузина, студ.; рук. О.В. Егошина, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ И ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ**

Установка для исследования физико-химических и теплогидравлических параметров водных теплоносителей была разработана на кафедре технологии воды и топлива НИУ «МЭИ» [1]. Установка рассчитана на работу с давлением воды до 24 МПа и температурой до 600 °С. Экспериментальный участок представляет собой обогреваемую электрическим током вертикальную трубку длиной 150 мм.

В 2013 г. экспериментальная установка была модернизирована и автоматизирована. В результате модернизации установка оснащена:

- современным водоподготовительным оборудованием;
- тремя независимыми пробоотборными линиями для проведения автоматического и лабораторного химического контроля;
- полнофункциональной системой химико-технологического мониторинга;
- системой автоматической подачи и поддержания на заданном уровне концентрации корректирующего реагента;
- необходимыми защитами и блокировками по давлению и температуре на случай аварийных ситуаций.

Автоматизированная система управления технологическими процессами установки представляет собой цифровую распределенную систему управления и реализуется на базе универсального программно-технического комплекса «КЭР-АТ».

Установка предоставляет возможность решения комплекса задач, а именно:

- изучения влияния физико-химических процессов на образование отложений на поверхностях, работающих в условиях принудительной циркуляции среды;
- исследования влияния различных водных режимов на коррозию сталей;
- влияние технологических факторов на интенсивность образования отложений при высоких параметрах.

### **Литература**

1. **Влияние** теплового потока на скорость образования отложений продуктов коррозии железа и меди в котлах / Т.И. Петрова, В.И. Кашинский, В.Н. Семенов и др. // Теплоэнергетика. 2008. № 7.

## Секция 45

# **СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

*Председатель секции — к.т.н., доцент А.А. Дудолин*

*Секретарь секции — аспирант Д.А. Ковалев*

*К.А. Андрюшин, асп.; рук-ли Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);*

*М.И. Сапаров, к.т.н. (ОАО ЭНИН)*

## **ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПЕРЕХОДА НА ПРИНЦИПЫ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ**

В 2014 году принят ряд важных нормативных правовых актов, содержащих комплекс мер по переходу на принципы наилучших доступных технологий (НДТ):

- Распоряжение Правительства Российской Федерации № 398-р [1];
- Федеральный закон Российской Федерации № 218-ФЗ [2].

В перечень объектов, которые попадают под действие вышеперечисленных нормативных правовых актов, входят объекты с номинальной проектной мощностью 50 МВт и более, т.е. практически все объекты теплоэнергетики.

Основная масса крупного генерирующего оборудования в нашей стране в ближайшие годы выработают свой парковый ресурс и потребуют замены или демонтажа. Для замены этих блоков в краткосрочной перспективе целесообразно отобрать проекты, отвечающие критериям НДТ.

Понятие «наилучшие доступные технологии» должно включать в себя не только оборудование, имеющее наилучшее сочетание показателей энергетической, экономической и экологической эффективности, но и наилучшие используемые на практике способы (методы, модели, программные продукты, нормативно-правовые документы) управления, планирования, создания (проектирования), эксплуатации и вывода из эксплуатации (демонтаж). Принципиально важно, чтобы НДТ для ТЭС рассматривались и определялись для всех этапов их жизненного цикла.

Основными целями перехода на принципы НДТ должны стать: создание современного отечественного оборудования; модернизация существующих производственных мощностей энергетического оборудования; строительство новых производственных мощностей, отвечающих миро-

вым показателям энергоэффективности и ресурсосбережения, а также повышение конкурентоспособности российской промышленности.

### **Литература**

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 19 марта 2014 г. № 398-р «Об утверждении комплекса мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий».

2. **Федеральный** закон Российской Федерации от 21 июля 2014 г. № 218-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

*Т.Н. Братченко, студ.; рук. Е.В. Дорохов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ УГОЛЬНОГО ЭНЕРГБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 330 МВт ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ПВД ПО СХЕМЕ ВИОЛЕН**

В соответствии со схемой и программой развития ЕЭС России до 2020 г. в топливном балансе ТЭС доля угля составит около 24 %. Наибольшая доля угольных ТЭС в ОЭС Урала и ОЭС Сибири. Планируется выводить из эксплуатации установленные мощности с давлением 9 МПа на Верхнетагильской, Серовской, Нижнетуринской и Южно-Уральской ГРЭС.

Для повышения энергоэффективности угольной энергетики необходимы замещающие мощности с более высокими начальными параметрами пара. В развитых странах мира успешно эксплуатируются угольные энергоблоки с параметрами пара  $28 \div 30$  МПа и температурой  $595 \div 620$  °С. Поэтому для Российской энергетики актуальна разработка проектов с аналогичными параметрами пара. В России изготовлены опытные партии труб на высокое давление и температуру до 620 °С.

Выполнено исследование тепловых схем блока мощностью 330 МВт на Кузнецком угле с начальными параметрами 28 МПа, 595/595 °С с двумя вариантами включения регенеративных подогревателей группы ПВД: последовательная схема; схема Виолен. Показатели энергоэффективности рассмотренных вариантов тепловой схемы приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

**Сравнение показателей энергетической эффективности**

Параметр	Последовательная схема включения ПВД	Схема Виолен
Удельный расход условного топлива, г/(кВт·ч)	294,68	294,19
КПД нетто энергоблока, %	41,74	41,81

Снижение удельного расхода топлива на 0,49 г/(кВт·ч) обеспечивает значительную годовую экономию топлива. Затраты на дополнительные трубопроводы группы ПВД окупаются менее чем за год.

### **Литература**

1. **Дорохов Е.В., Седлов А.С.** Основы проектирования тепловой схемы энергоблоков ТЭС на суперкритических параметрах. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*И.В. Гаранин, Е.Н. Олейникова, А.С. Соболев, аспиранты;  
рук. А.С. Седлов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЭЦ**

В современной энергетической системе является весьма актуальным вопрос о типе нового оборудования для замены стареющего. В энергетической стратегии предусматривается ввод большого количества парогазовых мощностей, однако не указывается область эффективного применения данной технологии для теплофикации. Технико-экономическая эффективность применения теплофикационных ПГУ имеет ряд особенностей. Для ТЭЦ московского региона характерен значительный разброс по соотношению вырабатываемой тепловой к электрической энергии. В силу этого при замене оборудования ТЭЦ на парогазовое со сложившимся преимущественно тепловым потребителем возникает либо дефицит тепловой мощности, либо избыток электрической. Дефицит тепловой мощности можно покрыть установкой дополнительных водогрейных котлов, что негативно скажется на капитальных вложениях на строительство.

В исследовании был проведен анализ технической эффективности покрытия годового графика для ТЭЦ-21 на примере применения паросилового оборудования на базе турбины Т-110-130 и ПГУ с двухконтурным КУ. В отопительный период разница в коэффициенте использования теплоты топлива (КИТТ) незначительна и составляет около 2 %, а в летнем режиме разница составила 18 %. В целом среднегодовая экономия топлива при использовании парогазовой технологии взамен паросиловой составила 16 %.

В результате экономического анализа было получено, что паросиловая технология дает преимущество по срокам окупаемости при условии, что капитальные затраты на 10 % меньше, чем для парогазовых. Более низкие капитальные затраты при техперевооружении без принципиальной смены технологии вполне реальны, так как сокращаются затраты на фундаментные, строительные-монтажные работы, также часть оборудования может быть вновь введена в строй после работ по продлению срока службы.

Из исследования следует вывод, что для ТЭЦ из-за особенностей производства как электроэнергии, так и теплоты, выбор оптимального типа оборудования во многом зависит от специфики региона потребления.

С.П. Горланов, асп.; рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф.  
(СамГТУ, г. Самара)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПГУ ПРИ ОТВОДЕ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ ГРАДИРНЮ

При эксплуатации испарительных башенных градирен на ТЭС возникает проблема избыточного увлажнения атмосферного воздуха [1]. Одним из направлений снижения увлажнения воздуха в башенных градирнях является осушка выбрасываемой из вытяжной башни градирни в атмосферу паровоздушной смеси, например путем совместной работы градирни с выбросными устройствами продуктов сгорания после котлоагрегатов или газотурбинных установок (ГТУ), работающих в парогазовом цикле.

В работе [2] предложено осуществлять отвод уходящих газов ГТУ, отработавших в котле-утилизаторе парогазовой установки, через вытяжную башню градирни вместе с подогретым в ней атмосферным воздухом. В рамках данной работы проведен расчет башенной градирни для случая отвода выхлопных газов ГТУ, отработавших в котле-утилизаторе парогазовой установки, через вытяжную башню градирни типа БГ-2600-70. Расход выхлопных газов ГТУ в соответствии с расчетными данными, приведенными в работе [3], принят равным  $G_T = 115,68 \text{ кг/с}$  ( $361\,657 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Выполнен расчет градирни при ее работе в штатном режиме и в режиме отвода выхлопных газов ГТУ через вытяжную башню. Анализ результатов расчетов показал, что при отводе выхлопных газов ГТУ через вытяжную башню в количестве  $115,68 \text{ кг/с}$  относительно случая работы градирни в штатном режиме самотяга башенной градирни возрастает с  $24,81$  до  $32,8 \text{ Па}$  (на  $32 \%$ ), при этом температура циркуляционной воды на выходе из градирни снижается с  $29$  до  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  (на  $6,9 \%$ ), что повышает эффективность работы паротурбинной установки ПГУ.

Таким образом, отвод выхлопных газов ГТУ, работающей в парогазовом цикле, в атмосферу через вытяжную башню градирни позволяет не только улучшить микроклимат на прилегающей территории, но и повысить эффективность работы градирни и парогазовой установки в целом, а также избежать затрат на строительство и обслуживание дымовой трубы.

### Литература

1. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. М.: ИНФРА-М, 2012.
2. **Патент № 2453712 (РФ)**. Парогазовая установка электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, С.П. Горланов // Оpubл. в Б.И. 2012. № 17.
3. **Кудинов А.А., Горланов С.П.** Анализ применения впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на базе двигателя НК-37 // Промышленная энергетика. 2013. № 7.

Д.А. Денищук, студ.; рук-ли В.Д. Буров, к.т.н., доц.;  
А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПГУ СО СЖИГАНИЕМ УГЛЯ В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

В 1992 году Венгерскими теплоэнергетиками была разработана схема ПГУ со сжиганием угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Схема проектировалась на венгерский бурый уголь. Основные показатели экономичности схемы представлены в табл. 1, принципиальная тепловая схема с основными параметрами рабочих тел представлена на рис. 1.

Таблица 1

Основные характеристики данной ПГУ с ЦКС

Параметр	Величина
Мощность электрическая ПГУ, МВт	265
Расход природного газа (49 МДж/кг), кг/с	3,8
Расход угля (6,9 МДж/кг), кг/с	62
КПД по выработке э/э, %	47,1

Данная тепловая схема может быть реализована в России с использованием в качестве твердого топлива углей российских бассейнов. Соотношение расходов угля и природного газа 69/31 % соответственно. Котлы с ЦКС позволяют одинаково эффективно сжигать разные типы углей. Реализация подобных схем позволит получить высокоэкономичные современные блоки с КПД более 45 %, уменьшить издержки на топливо, а также увеличить долю использования угля на энергоснабжение страны, тем самым повысить энергетическую безопасность России.

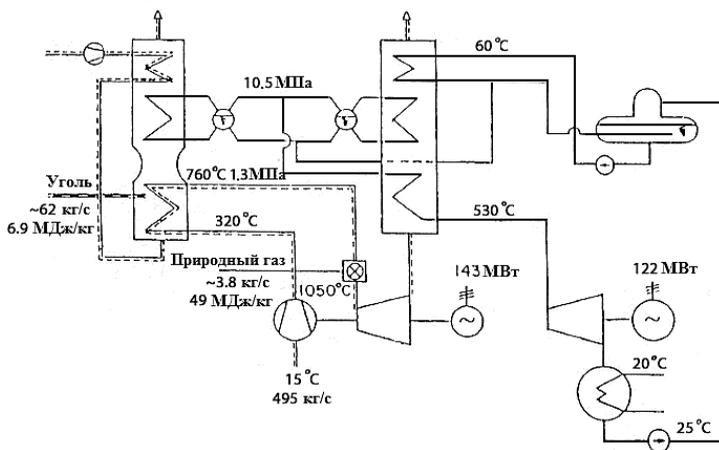


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ с ЦКС

Д.А. Денищук, студ.; рук-ли В.Д. Буров, к.т.н., доц.;  
А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## О ПЕРСПЕКТИВАХ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТЭС НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ПАРА

Строительство пылеугольных ТЭС на ультрасверхкритических параметрах пара позволит тепловой энергетике России выйти на принципиально новый уровень. Данные станции обладают рядом преимуществ по сравнению со схемами на сверхкритических параметрах тех же мощностей, такими как более высокий КПД и сравнительно низкий уровень выбросов углекислого газа (в среднем на 15 %). Основные характеристики современных ультрасверхкритических блоков, разрабатываемых в Европе и Японии, представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Основные характеристики современных ультрасверхкритических блоков, разрабатываемых в Европе и Японии

Параметр	Величина
Начальная температура пара, °С	600–730
Температура промежуточного перегрева пара, °С	600–760
Начальное давление пара, МПа	30–37,9
КПД по выработке э/э, %	45–47

Переход на ультрасверхкритические параметры возможен только при наличии новых высокотемпературных сплавов, способных выдерживать необходимые параметры рабочего тела. Как следствие, разработка таких схем приведет к развитию металлургической промышленности, а также скачку в области котлостроения и турбостроения России. Стоит отметить, что при проектировании подобных схем необходимо опираться на опыт западных коллег, но при этом разрабатывать и внедрять собственные технологии с использованием отечественного оборудования. Проектирование и строительство станций на ультрасверхкритических параметрах позволит получить высокоэкономичные современные тепловые электростанции с КПД более 47 % [1], уменьшить выбросы двуокси углерода, а также увеличить долю использования угля на энергообеспечение страны, тем самым повысить энергетическую безопасность России.

### Литература

1. **Janos Beer.** High Efficiency Electric Power Generation // The Environmental Role, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139 USA.

А.П. Зимин, асп.; рук. Г.В. Ледуховский, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ БАЛАНСОВ ПО ДАННЫМ ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА НА ТОЧНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЭС

Сведение материальных балансов по данным первичного учета для отдельных единиц и групп оборудования ТЭС согласно требованиям руководящих документов должно предшествовать расчету конечных фактических и нормативных показателей тепловой экономичности (прежде всего, удельных расходов условного топлива, а также составляющих резерва тепловой экономичности – РТЭ, выраженных количеством перерасходованного и сэкономленного за период условного топлива).

Ранее нами предложен ряд методов сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах сложной структуры в условиях недостаточности первичной информации, базирующихся на формулировках задачи регуляризации Тихонова, аналитических и численных методах ее решения [1]. Задачей настоящей работы является выявление количественной связи между способом сведения материального баланса участка схемы от питательных насосов до паромеров свежего пара турбин конкретной ТЭЦ и конечными показателями тепловой экономичности.

В табл. 1 приведены результаты расчета РТЭ за месяц. В каждом из расчетов использованы значения основных потоков теплоносителя, полученные при сведении материального баланса разными способами.

Таблица 1

### Результаты расчета при разных вариантах сведения материального баланса

Значение РТЭ, т у.т./мес. при разных способах сведения материального баланса					
Без сведения баланса	Решения задачи регуляризации материальных потоков (без учета ограничений по потокам энергии)			Совместная регуляризация материальных и энергетических потоков (численные решения)	
	Аналитическое, скалярная постановка	Численное, скалярная постановка	Численное, векторная постановка	Аддитивный интегральный критерий	Мультипликативный интегральный критерий
1054	610	117	324	570	545

Итак, ошибка, вызванная некорректным сведением материального баланса или отсутствием работы по сведению балансов, сопоставима с искомым показателем – РТЭ. Это нужно учитывать при разработке программно-технических комплексов ТЭС.

### Литература

1. **Векторная** регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 4.

*В.С. Калмыков, студ.; рук. Г.И. Шамшурина, ст. преп.  
(СамГТУ, г. Самара)*

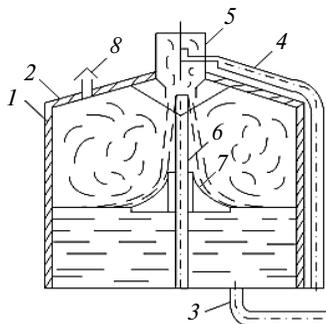
## **МОДЕРНИЗАЦИЯ БАКА-АККУМУЛЯТОРА ДЕАЭРИРОВАННОЙ ВОДЫ**

С целью повышения экономичности теплофикационной установки при переменных режимах работы предлагается модернизация бака-аккумулятора деаэрированной воды. Для снижения расхода перегретой воды в баке-аккумуляторе на создание паровой подушки предлагается дополнительно установить расширитель, а также вертикальную штангу с поплавком-рассекателем, установленным на штанге [1]. Рабочий процесс предлагаемого бака-аккумулятора осуществляется следующим образом. Через патрубок 3 деаэрированная вода поступает в бак с температурой 60–80 °С и заполняет его до уровня, определяемого режимом теплофикационной системы. Перегретая вода с температурой 120–150 °С через патрубок 4 подводится в расширитель 5 и дросселируется до атмосферного давления с выделением вторичного пара. Вода из расширителя 5 сливается вдоль центральной вертикальной штанги 6, увлекая за собой пар. Пар выходит в свободный объем над уровнем воды в баке, создавая паровую подушку, препятствующую повторному заражению деаэрированной воды кислородом воздуха. Вода из расширителя 5 падает на поплавок-рассекатель 7 и тонким ровным слоем подается на поверхность деаэрированной воды в баке, образуя непрерывно обновленный слой горячей воды с температурой 100 °С на границе раздела пар-вода.

При изменении режима теплофикационной системы и уровня деаэрированной воды в баке поплавок-рассекатель 7 перемещается вдоль направляющей штанги 6 вверх и вниз, обеспечивая непрерывное обновление защитного слоя горячей воды.

### **Литература**

1. А. с. № 1321686. Бак-аккумулятор деаэрированной воды / Л.П. Шелудько, В.Д. Муравьев, Г.И. Шамшурина // Открытия. Изобретения. 1987. № 25.



**Рис. 1. Бак-аккумулятор:**

1 – металлический корпус; 2 – тепловая изоляция; 3 – патрубок подвода деаэрированной воды; 4 – патрубок подвода перегретой воды; 5 – расширитель; 6 – центральная вертикальная направляющая штанга; 7 – поплавок-рассекатель потока; 8 – дыхательный патрубок

## К ОПТИМИЗАЦИИ ДОЛИ ОТПУСКА ТЕПЛА ИЗ ОТБОРОВ ТУРБИН ДЛЯ ПГУ ТЭЦ

Переход к рыночным условиям работы в энергетике изменил условия потребления и производства электроэнергии. Для ТЭЦ, отпускающих тепловую и электрическую энергию, эти условия еще более усложнились. Стоит отметить постепенное снижение потребления тепловой энергии на теплоснабжение и ГВС за счет проведения энергосберегающих мероприятий, а также снижение теплопотребления промышленности.

С 2008 г. началось обновление парка установленного оборудования, значительная часть которого приходится на ТЭЦ. Обновление оборудования проводится на базе парогазовых и газотурбинных технологий, имеющих более высокие КПД по производству электроэнергии и более высокую выработку электроэнергии на тепловом потреблении (табл. 1).

Таблица 1

### Показатели различных типов станций

Тип станции	Используемое топливо	Ед. мощность установки, МВт	Уд. выработка на тепловом потреблении	Эл. КПД	КИТТ
ПГУ-ТЭЦ	Все виды	6–250	0,2–0,73	0,1–0,38	До 90
ГТУ-ТЭЦ	Газ, ГТ топливо	6–300	0,2–1	0,2–0,46	До 85
ПГУ-ТЭЦ	Газ, ГТ топливо	9–800	0,3–1,4	0,3–0,58	До 85
ГПА	Газ, ДТ	0,2–17	0,3–1	0,3–0,46	До 95

Все это требует пересмотра режимов работы ТЭЦ в условиях рынка и пересмотра устоявшихся положений по соотношению отпуска тепла из отборов турбин и от пиковых источников [1, 2]. Для определения изменений в данной работе была проведена оценка оптимального коэффициента  $\alpha_{ТЭЦ}$  для вновь вводимого оборудования на базе ПГУ.

В качестве основных факторов учитывались капитальные и эксплуатационные затраты станции, тепловых сетей, пиковых источников и другие эксплуатационные расходы и затраты на топливо.

Результаты расчетов показывают существенное снижение оптимальной величины  $\alpha_{ТЭЦ}$  для оборудования на базе ПГУ до 0,35 в зависимости от показателей выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

### Литература

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебн. для вузов. – 7-е изд., стереот. М.: Издательство МЭИ, 2001.
2. **Хрилев Л.С., Смирнов И.А.** Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / под ред. Е.Я. Соколова. М.: Энергия, 1978.

С.М. Крашенинников, асп.; рук-ли В.Д. Буров, к.т.н., доц.;  
А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ОПТИМИЗАЦИЮ ПГУ-ТЭЦ НА БАЗЕ ПГУ 6FA

Одно из направлений повышения энергоэффективности теплоэнергетики страны – переход от паросиловых ТЭС на газе к блокам ПГУ-ТЭС. Освоение новых технологий позволит постепенно вывести из эксплуатации морально устаревшее и физически изношенное оборудование, объемы которого постоянно нарастают.

Для повышения технического уровня ТЭЦ была разработана ОАО «Интер РАО» «Комплексная инновационная программа строительства теплофикационных энергоблоков ПГУ на базе газовых турбин 6FA General Electric на период до 2020 года». Согласно данной программе планируется ввод мощностей в различных климатических регионах на территории РФ.

ПГУ в отличие от технологии ПТУ сильно зависит от параметров окружающего воздуха [1]. В работе проведена оценка влияния климатических факторов региона на конечные экономические показатели блока ПГУ-ТЭЦ с котлом-утилизатором одного давления. Сводные результаты технико-экономического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты сравнения годовой работы блоков ПГУ-ТЭЦ  
в зависимости от климатического региона**

Характеристика	Значение		
	Астрахань	Ярославль	Омск
Суммарная отпущенная электроэнергия, МВт·ч	839 937	826 803	829 034
Суммарная отпущенная тепловая энергия, Гкал	281 000	281 000	281 000
Среднегодовой КИТТ, %	64,54	64,52	64,53
Среднегодовой эл. КПД нетто (физ. метод), %	57,80	57,69	57,72
Удельная стоимость капитальных затрат, \$/кВт	1788	1813	1818
Внутренняя норма рентабельности, %	21,74	21,49	21,44
Суммарный расход условного топлива с учетом системного эффекта, т	213 358	213 689	213 606

Расчеты показали, что климатические факторы регионов влияют на оптимальные параметры пара. Отмечается, что чем ближе климатические характеристики регионов, в которых проектируются блоки, тем менее очевидна разница в годовых показателях работы этих блоков.

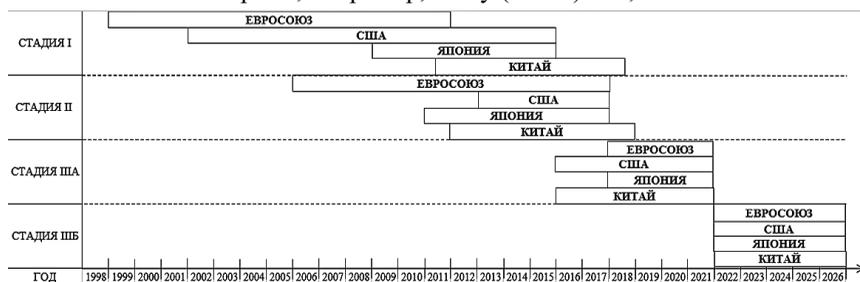
### Литература

1. Газотурбинные энергетические установки / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка. М.: Издательство МЭИ, 2011.

Е.Н. Олейникова, И.В. Гаранин, А.С. Соболев, аспиранты;  
рук. А.А. Дудолин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УГОЛЬНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ УСКП

Стратегия развития энергетической отрасли России направлена на создание новых генерирующих мощностей, работающих как на газовом, так и на угольном топливе. Наряду с газовой генерацией предусматривается создание новых паросиловых блоков, работающих на угле с ультра-суперсверхкритическими параметрами пара (УСКП) с начальной температурой и давлением 700–760 °С и 30–40 МПа соответственно. По оценке электрический КПД таких установок составит более 47 %. На сегодняшний момент в мире уже достигнуты ССКП (суперсверхкритические параметры) 26–30 МПа/600–650 °С, позволившие получить КПД блока больше 45 % и значительно снизить выбросы CO<sub>2</sub>. Следующим шагом в развитии угольных технологий является переход к УСКП. В настоящее время все ведущие страны мира ведут ряд разработок энергоблоков на УСКП (рис. 1) [1]. Основными сложностями на пути создания данных блоков являются значительные объемы финансирования проектов, вызванные необходимостью применения дорогостоящих и недостаточно изученных суперсплавов на основе никеля и хрома, например, Alloy (сплав) 617, 625 и 740.



Примечание: Индия планирует проведение стадий I–III Б в период 2008–2023 гг.

Рис. 1. Стадии разработки энергоблоков УСКП в мире:

I – лабораторные испытания; II – испытания на крупных промышленных стендах; III – строительство; IV – освоение

Таким образом, задача создания блоков УСКП в России является весьма актуальной и требующей скорейшего решения. На данной (начальной) стадии необходим системный подход в исследовании и разработке схем в силу особенностей применения различных высокотемпературных материалов основных узлов и агрегатов.

### Литература

1. Сайт Центра чистых угольных технологий CCC URL: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/home>

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ГИДРОМУФТ НА ПИТАТЕЛЬНЫЕ НАСОСЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС**

Установка гидромуфты на привод питательных электронасосов (ПЭН) ТЭС является известным энергосберегающим мероприятием, суть которого сводится к замене дроссельного регулирования производительности ПЭН регулированием частоты вращения ротора насоса, что обуславливает экономию электроэнергии на собственные нужды ТЭС и соответственно увеличение технико-экономических показателей производства тепловой и электрической энергии. Однако проведение количественной оценки эффективности рассматриваемого мероприятия существенно затрудняет сложность выбора исходных данных и отсутствие адекватной расчетной методики для определения рабочих характеристик ПЭН с гидромуфтой.

В работе предложен автоматизированный алгоритм, предусматривающий последовательное решение следующих задач:

1. Расчет характеристики сети (зависимости гидравлического сопротивления трубопроводов питательной воды от ПЭН до сниженного узла питания котла от расхода питательной воды) при минимальном перепаде давлений на регуляторе питания. Используются методы гидравлического расчета водяных трубопроводов. Настройка расчетной модели осуществляется по выборке результатов натуральных измерений для конкретного энергоблока.

2. Расчет рабочих характеристик ПЭН (зависимостей напора, мощности и КПД насоса от расхода питательной воды) при переменном числе оборотов ротора. Используется математическая модель, разработанная на кафедре ТЭС ИГЭУ, точность которой характеризуется максимальным отклонением расчетных параметров от результатов измерений 7 %.

3. Расчет экономии электроэнергии за средние сутки. Исходными данными являются результаты расчетов по п. 1 и 2, а также задаваемый по получасовкам суточный график электрической нагрузки энергоблока и зависимость, связывающая электрическую мощность энергоблока с расходом питательной воды на котел.

4. Расчет показателей экономической эффективности – чистого дисконтированного дохода и дисконтированного срока окупаемости. Используются заданные стоимостные показатели энергоресурсов и гидромуфты.

Разработанный алгоритм позволяет определить целесообразность установки гидромуфты на ПЭН энергоблоков в конкретных условиях.

А.П. Процан, студ.; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц.  
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ УГЛЕЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*Актуальность.* На долю твердого топлива приходится 92 % в общем мировом балансе запасов топливных полезных ископаемых [1]. Общие запасы угля в Республике Казахстан составляют 162 млрд т. Насчитывается 10 бассейнов каменного и бурого угля, разведано более 300 месторождений. Ежегодная добыча составляет 100 млн т угля [2]. По данным статистического обзора мировой энергетики (Statistical Review of World Energy), подготовленного британской компанией BP, на конец 2012 года Казахстан по доказанным запасам угля занимает 8 место [3].

По прогнозам экспертов роль угля в энергетическом балансе в ближайшее время повысится. Для Казахстана это также актуально, так как по имеющимся данным запасы угля составляют 3,9 % мировых запасов [3]. В РК разработана Концепция развития угольной промышленности до 2020 года [4]. Важным условием является совершенствование существующих и разработка новых технологий сжигания угля.

*Методы и методика исследования.* Использовались стандартные методики для определения влажности, зольности, летучих веществ и теплоты сгорания ВУТ. Исследовали уголь месторождения «Каражыра» ВКО, и его пригодность для приготовления ВУТ.

*Результаты исследования.* Использование исследуемых углей для приготовления ВУТ оправдано и при этом снижаются удельные нормы топлива на выработку единицы тепловой энергии.

*Выводы.* Уголь разреза «Каражыра» по своим характеристикам может быть использован для сжигания в виде водоугольного топлива (ВУТ).

### Литература

1. **Водоугольное** топливо (ВУТ). Перспективы производства и использования с применением гидродинамической мельницы. URL: <http://www.pandia.ru/text/77/502/31089.php>

2. **Комитет** геологии и недропользования Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан. URL: <http://geology.gov.kz/ru/okomitete/polozhenie>

3. **КУРСИВ.Kz/** По запасам нефти в мире Казахстан на 12 месте. BP. URL: <http://www.kursiv.kz/news/>

4. **Концепция** развития угольной промышленности Республики Казахстан на период до 2020 года. URL: [http://ru.government.kz/docs/\\_644.htm](http://ru.government.kz/docs/_644.htm)

## К ВЫБОРУ СХЕМЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ВАКУУМНО-АТМОСФЕРНОЙ ДЕАЭРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ДЕАЭРАТОРАМИ «ДСА» И «АВАКС»

Деаэраторы «АВАКС» – вакуумно-атмосферные кавитационные струйные. Эффект деаэрации для них, как правило, не превышает  $\xi = 90\%$  (для атмосферного струйно-барботажного деаэратора серии «ДА-м»  $\xi = 99,5\%$  и более). Причины относительно низкой эффективности деаэраторов «АВАКС» состоят в том, что деаэратор одноступенчатый, прямооточный и характеризуется малым располагаемым временем процесса. При этом малые размеры, дешевизна, а также отсутствие потребности в греющем паре следует признать преимуществами деаэратора.

Опыт эксплуатации деаэраторов «АВАКС» показывает целесообразность совершенствования схем их включения в технологические схемы энергообъектов. В настоящей работе рассмотрен пример технического решения, предусматривающего объединение в одну схему струйного деаэратора устаревшей конструкции типа «ДСА» и деаэратора «АВАКС».

Конструкция деаэраторов «ДСА» не предусматривает парового барботажа ни в деаэраторном баке, ни в деаэрационной колонке, поэтому эффективность деаэрации воды обычно не удовлетворяет нормам. Часто такие деаэраторы реконструируются с организацией парового барботажа, что решает проблему качества деаэрированной воды. Но в ряде случаев такая реконструкция невозможна, поскольку барботажный пар должен иметь давление большее, чем основной пар. Для такого случая выполнена разработка рассматриваемого технического решения. По результатам анализа выбрана схема, в которой «АВАКС» устанавливается на линию рециркуляции деаэрированной воды, забираемой насосом после «ДСА», со сбросом воды после «АВАКС» на вход деаэратора «ДСА».

Для указанной технологической схемы выведены расчетные выражения, связывающие концентрацию растворенного кислорода в деаэрированной воде с его начальной концентрацией, кратностью циркуляции воды через «АВАКС», а также эффектами деаэрации для деаэраторов «ДСА» и «АВАКС»  $\xi$ , определенными по результатам натурных испытаний при различных значениях режимных параметров.

Решение позволяет в данном и аналогичных случаях получать воду требуемого химического качества во всем диапазоне гидравлической нагрузки установки путем соответствующего регулирования кратности циркуляции.

*А.Н. Росляков, асп.; А.Ю. Петухова, студ.;  
рук. Г.В. Ледуховский, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **БЛОЧНАЯ ДВУХЦЕЛЕВАЯ ДЕАЭРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИХРЕВОГО ДЕАЭРАТОРА**

Совершенствование установок и технологических схем термической деаэрации воды объектов энергетики, направленное на уменьшение удельных затрат энергии на подготовку теплоносителя, остается актуальной задачей. До настоящего времени многие ТЭЦ работают в составе систем теплоснабжения с открытым водоразбором, хотя государственная политика в этом отношении и предусматривает постепенный переход к закрытым тепловым сетям. Для таких объектов характерны большие потребности в деаэрированной подпиточной воде теплосети при относительно малых расходах обессоленной деаэрированной добавочной воды цикла. В этом случае возможно объединение технологических схем подготовки двух указанных теплоносителей в одну двухцелевую установку.

В работе предлагается деаэрационная установка на базе центробежно-вихревого деаэратора (ДЦВ) перегретой воды. Преимуществом деаэратора являются его малые размеры и относительная простота эксплуатации при большой единичной производительности (до 800 т/ч). Недостаток – относительно большой удельный расход выпара, удаляемого эжектором (10–25 кг выпара на тону деаэрированной воды). Этот недостаток в рассматриваемой схеме устраняется установкой конденсатора выпара поверхностного типа, разрежение в котором поддерживается эжектором. Конденсат выпара, представляющий собой дистиллят, сливается в баки запаса дистиллята, откуда насосами подается в схему добавочной воды цикла. Охлаждающей средой в конденсаторе выпара является исходная вода, направляемая в ДЦВ на деаэрацию, которая после конденсатора дополнительно перегревается в пароводяном или водоводяном теплообменнике.

Разработана математическая модель, включающая технологический расчет ДЦВ, поверочные тепловые расчеты конденсатора выпара, теплообменника-перегревателя воды, гидравлический расчет тракта отсоса выпара. Модель позволяет рассчитать расходы и параметры теплоносителей по схеме деаэрационной установки при изменении режимных параметров.

Предложенная схема блочной двухцелевой деаэрационной установки производительностью по воде подпитки теплосети 160–880 т/ч обеспечивает получение дистиллята с расходом до 22 т/ч при его стоимости, аналогичной стоимости дистиллята, производимого многоступенчатой испарительной установкой.

*А.С. Соболев, И.В. Гаранин, Е.Н. Олейникова, аспиранты;  
рук. А.С. Седлов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОТПУСКА ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВКИ Т-110/120-130 С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В настоящее время в структуре генерирующих мощностей России основную роль играет оборудование с традиционным паросиловым циклом. Необходимость технического перевооружения ТЭЦ определяется и тем, что комбинированный метод производства электроэнергии и тепла на ТЭЦ снижает потребность в топливе примерно на 30 % по сравнению с раздельным. Теплофикация и в новых экономических условиях сохраняет свою эффективность как при реконструкции действующих, так и при строительстве новых ТЭЦ.

Одной из основных задач ТЭЦ является нагрев требуемого количества сетевой воды с температурой  $t_{0,c}$  до требуемой температуры  $t_{п,c}$  по тепловому графику теплосети [1]. Для осуществления необходимого отпуска тепла потребителю применяют различные технологические схемы и выбор конкретной тепловой схемы не всегда очевиден.

В ходе работы были проанализированы факторы, влияющие на показатели тепловой экономичности (температура наружного воздуха, расход сетевой воды, работа по электрическому графику теплосети, летний и переходные режимы), а также различные технологические схемы отпуска тепла от теплофикационной турбины Т-110/120-130. Расчет выполнялся для погодных условий Московского региона. Были рассмотрены двухступенчатый и трехступенчатый подогревы сетевой воды с поворотной диафрагмой, а также трехступенчатый подогрев при качественно-количественном методе регулирования (регулирование температуры прямой сетевой воды происходит за счет байпасирования части расхода сетевой воды).

Рекомендуется применять комбинированную тепловую схему, где в летнем режиме и режимах с расходом сетевой воды около 2000 т/ч при температурах (+5, +3; 0) °С наиболее эффективно использовать схему с нерегулируемыми теплофикационными отборами. При снижении температуры до -5 °С и ниже при расходе сетевой воды от 2000 до 3000 т/ч наиболее эффективным является трехступенчатый подогрев сетевой при регулировании тепловой нагрузки поворотной диафрагмой.

### **Литература**

1. Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. Тепловые электрические станции. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*Б.Д. Теплов, асп.; рук. В.Д. Буров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МИНИМУМА НАГРУЗКИ ПАРОГАЗОВОГО ЭНЕРГБЛОКА**

Важным показателем маневренности ПГУ является технологический минимум нагрузки энергоблока, который в общем случае лимитируется увеличением влажности пара в последней ступени паровой турбины при снижении температуры пара контура высокого давления, а также увеличением концентрации вредных выбросов в уходящих газах при работе камер сгорания ГТУ на пониженных нагрузках.

В работе проведен расчетный анализ режимов частичной нагрузки парогазового энергоблока и выявлены ограничения технологического минимума нагрузки. Расчетные исследования выполнены с использованием математической модели ПГУ, верифицированной по результатам испытаний ПГУ-410 Невинномысской ГРЭС. Проведенные на основе разработанной модели ПГУ-410 расчеты показали, что снижение температуры отработавших в ГТУ газов при снижении мощности газовой турбины после полного прикрытия ВНА, приводящее к соответствующему снижению температуры пара высокого давления, при работе парового контура на скользящем давлении не создает опасности эрозионного износа рабочих лопаток последней ступени паровой турбины. Ограничения технологического минимума нагрузки связаны с резким увеличением выбросов оксидов азота и СО при переходе на раздельную подачу воздуха и топлива в зону горения, которое в этом случае происходит в диффузионном режиме.

Авторами доклада предложен способ снижения технологического минимума нагрузки и расширения регулировочного диапазона ПГУ, в соответствие с которым при достижении предельно допустимого значения коэффициента избытка воздуха в КС при разгрузке ГТУ дальнейшее снижение нагрузки осуществляется за счет сброса части сжатого в компрессоре воздуха на его вход (например, через АОС) с поддержанием значения коэффициента избытка воздуха на уровне, при котором обеспечивается достаточная устойчивость горения предварительно подготовленной топливовоздушной смеси. Снижение нагрузки ГТУ в этом случае сопровождается увеличением температуры выхлопных газов, значение которой лимитирует технологический минимум нагрузки ПГУ. Так, при температуре наружного воздуха, равной  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и перепуске части (38 кг/с или 5,2 % номинального значения) сжатого в компрессоре воздуха на его вход технологический минимум нагрузки ГТУ может быть снижен на 39 МВт. При более высоких значениях температуры наружного воздуха вплоть до  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  расширение регулировочного диапазона ПГУ возможно, но в меньшей степени.

## **РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Для расчета переменных режимов работы ГТУ, исследования и контроля их технического состояния, необходимо располагать алгоритмами расчета, результаты которых максимально приближены к опытным значениям, полученным путем режимных испытаний.

В работе рассматривается разработанный алгоритм расчета переменного режима ГТУ SGT5-4000F (Siemens AG) и его программная реализация в компьютерной системе MS Excel. Отличительной особенностью рассматриваемого алгоритма является использование экспериментальных характеристик, полученных при статистической обработке результатов тепловых испытаний ГТУ SGT5-4000F Невинномысской ГРЭС в широком диапазоне нагрузок, наружных температур и углов установки ВНА компрессора. Уравнение аппроксимирующей зависимости определяется с учетом теории турбомашин и по данным эмпирических исследований влияния параметров ГТУ на рассматриваемый параметр. В алгоритме расчета переменного режима ГТУ используются экспериментальные обобщенные зависимости, необходимые для построения универсальной характеристики компрессора, а также экспериментальные зависимости для расчета КПД турбины, сопротивлений входного тракта, выхлопного тракта, тракта компрессор-турбина, потерь электрической мощности.

Расчет тепловой схемы ГТУ происходит последовательно в соответствии с расположением ее элементов (компрессора, газовой турбины, камеры сгорания и камеры дожигания) по ходу рабочей среды. В алгоритме реализованы возможности расчетов при различных режимах регулирования ГТУ: постоянстве электрической мощности, поддержании температуры газов перед турбиной или температуры выхлопных газов, регулировании мощности и температуры газов за турбиной перепуском части сжатого в компрессоре воздуха на его вход или сбросом этого воздуха в окружающую среду (или в выхлопной тракт).

В результате проведенных расчетов эксплуатационных режимов установлено, что разработанный алгоритм и программа расчета переменного режима ГТУ, обеспечивают достаточную сходимость результатов расчета с результатами обработки данных тепловых испытаний ГТУ SGT5-4000F Невинномысской ГРЭС ( $\delta = 1 \div 2 \%$ ), что позволяет использовать ее для прогнозирования результатов испытаний ГТУ до их проведения.

## ТЭС НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ПАРА

Ускорение темпов экономического развития страны повышает спрос на электроэнергию. В этой связи разработка новых угольных блоков на ультрасверхкритические параметры пара (УСКП) представляется актуальной задачей.

Проведенный технический анализ блока на сверхкритические параметры пара (ССКП) и блока на 700 °С (УСКП), представленный в табл. 1, показал, что тепловая экономичность при переходе на более высокие параметры пара улучшается на 6 % [1].

Таблица 1

**Сравнение рабочих параметров ССКП и УСКП блока 840 МВт**

Показатель	ССКП	УСКП
Электрическая мощность, брутто	840 МВт	840 МВт
Параметры пара в голову ПТУ (давл., темп.)	24,1 МПа, 600 °С	30 МПа, 700 °С
Параметры промперегрева (давл., темп.)	4,3 МПа, 600 °С	6,0 МПа, 730 °С
Температура питательной воды	292 °С	330 °С
Изменение термического КПД	–	6 % (увеличение)

В рассматриваемой схеме паротурбинная установка состоит из однопоточного ЦВД, одного двухпоточного ЦСД и ЦНД и одного генератора. Пар по главному паропроводу от котла проходит через четыре стопорных клапана и четыре регулирующих клапана и поступает в ЦВД, где расширяется и возвращается к котлу для повторного перегрева. Перегретый пар из котла проходит через четыре клапана запорной арматуры и четыре клапана системы промперегрева и вводится в ЦСД. Совершив работу в ЦСД, пар поступает в перепускной паропровод, который транспортирует пар к ЦНД, где, выработав мощность, сбрасывается в конденсатор.

Повышение начальных параметров при традиционном паросиловом способе сжигания угля – это наиболее простой и действенный способ вовлечения в энергетику наименее «благородного» топлива.

### Литература

1. **Janos Beer.** High Efficiency Electric Power Generation // The Environmental Role. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. MA 02139 USA.

С.В. Усов, асп.; рук. А.А. Кудинов, проф., д.т.н. (СамГТУ, г. Самара)

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПГУ-200 СТЭЦ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ THERMOLIB

ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ (СТЭЦ) включает в себя две газовые турбины PG6111FA с генераторами 6FA, два паровых котла-утилизатора типа КУП-110/15-8,0/0,7-540/200 и одну паровую турбину «Siemens SST-600» типа ПТ-60/75-8,0/0,7 с генератором S-GEN5-100, эксплуатируется с октября 2013 г. Описание алгоритма работы ПГУ-200 приведено в [1]. На кафедре ТЭС СамГТУ разработана математическая модель энергоблока ПГУ-200 СТЭЦ в программном комплексе MatLab Simulink (Приложение Thermolib).

Thermolib является объектно-ориентированной графической средой для динамического моделирования теплотехнических процессов. Расчет параметров многомерной среды в Thermolib осуществляется при помощи полиномов NASA, которые получены на основе канонического уравнения состояния термодинамической системы, записанного через термодинамические потенциалы [2, 3]. При создании модели ПГУ-200 учтены конструктивные особенности оборудования и характеристики их систем регулирования.

Проведены расчеты и установлены зависимости расходов пара, газов, питательной воды и мощностей газовой турбины и ПГУ (рис. 1) от времени пуска до вывода блока на стационарный режим. Исследования показали, что результаты расчетов параметров работы ПГУ-200 СТЭЦ, полученные по программе Thermolib, хорошо согласуются с данными натурных испытаний, что позволяет считать сформированную математическую модель адекватной и принять ее для дальнейшей работы.

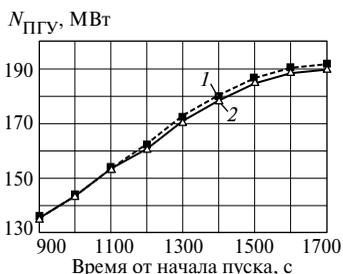


Рис. 1. График набора мощности ПГУ-200 СТЭЦ:

- 1 – экспериментальные данные;
- 2 – данные с модели Thermolib

### Литература

1. Усов С. В., Кудинов А.А. Анализ технико-экономических показателей Сызранской ТЭЦ после ввода в эксплуатацию ПГУ-200 // Энергетик. 2013. № 12.
2. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем: Термодинамика. Том 1. – 2-е изд., испр. и доп. М.: УРСС, 2002.
3. Справочник Национального института стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, Secretary of Commerce on behalf of the United States of America) URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

*П.В. Фёдоров, студ.; рук. Д.В. Сиденков, к.т.н., доц., (НИУ «МЭИ»)*

## **КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛОТЫ**

Рассмотрена схема комбинированной установки для производства электроэнергии и теплоты в составе паросиловой установки и теплонасосной установки на низкокипящем рабочем веществе [1]. Показана возможность применения различных рабочих веществ в циклах этих установок, что будет способствовать повышению эффективности таких когенерационных систем. Проведен расчет циклов паротурбинной и теплонасосной установки на рабочем веществе R134a. Предложено использовать теплообменные аппараты пластинчатого типа в качестве теплообменника в данной комбинированной установке. Разработана методика теплогидравлического расчета пластинчатых теплообменников, реализованная в пакете MathCAD, что позволяет оперативно оценивать эффективность установок подобного типа.

Выбор фреоновых теплоносителей связан с тем, что при низких рабочих температурах органические жидкости приводят к повышению эффективности цикла, и термодинамические процессы происходят при более низких температурах [2]. Эти преимущества позволяют использовать арматуру с наименьшей допустимой температурой, а также использовать более компактное оборудование [2]. Безусловно, это дает экономичность в капитальных затратах.

Основной целью работы является решение проблемы использования теплоты антропогенных, техногенных и природных источников теплоты различного температурного потенциала для выработки электроэнергии и теплоты, которая обеспечивается с помощью когенерационной установки, сочетающей в себе паросиловую часть (ПТУ), работающую по «органическому» циклу Ренкина и теплонасосную установку (ТНУ) [1].

### **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.

*К.Р. Хусаинов, асп.; рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф.  
(СамГТУ, г. Самара)*

## **ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ВОДЯНОГО ПАРА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПГУ**

В настоящее время на тепловых электрических станциях осуществляется процесс строительства и ввода в эксплуатацию парогазовых установок (ПГУ). Основным преимуществом парогазовых блоков является высокая тепловая экономичность, обусловленная использованием теплоты уходящих газов в котле-утилизаторе для выработки перегретого водяного пара, подаваемого на паровую турбину [1]. Однако коэффициент полезного действия паровых турбин, работающих в составе ПГУ, не достигает высоких значений, что обусловлено отсутствием системы регенерации и сравнительно невысокими параметрами перегретого пара. По этой причине целесообразным является использование промежуточного перегрева водяного пара, что значительно повышает тепловую экономичность паровой турбины за счет подвода к водяному пару дополнительной теплоты.

Первой установкой данного типа в РФ стала трехконтурная ПГУ-800 Киришской ГРЭС, состоящая из двух газотурбинных установок Siemens V94.3A, двух котлов-утилизаторов П-132 и паротурбинной установки К-245. При этом промежуточный перегрев водяного пара осуществляется в котле-утилизаторе в зоне высоких температур.

В рамках данной работы рассматривается альтернативный вариант расположения промежуточного пароперегревателя, согласно которому отработавший пар после цилиндра высокого давления паровой турбины повторно перегревается в камере сгорания газотурбинной установки, после чего направляется в цилиндр среднего давления. Был проведен тепловой расчет трехконтурной ПГУ-800 применительно к рассматриваемому принципу действия парогазового блока по методике, изложенной в [2]. Анализ результатов расчетов показал, что коэффициент полезного действия ПГУ-800 с использованием промежуточного перегрева водяного пара в камере сгорания газотурбинной установки составил 58,63 %, а удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии – 210 г/(кВт·ч).

### **Литература**

1. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. М.: ИНФРА-М, 2012.
2. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Парогазовые установки тепловых электрических станций. Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2014.

*Т.С. Цивлина, Л.О. Колякина, студенты;  
рук-ли Е.В. Макаревич, к.т.н., доц., А.Н. Роголев, к.т.н. ст. преп.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ НА БЛОКАХ С СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПАРА**

В энергетической стратегии России [1] одним из главных направлений инновационного обновления энергетики является разработка мощных (660–800 МВт) экологически чистых угольных конденсационных энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара (ССКП) 36 МПа и 700 °С с температурой промежуточного перегрева пара 720 °С. Переход на такие параметры пара позволит повысить КПД пылеугольных блоков с 36–37 % до 43–47 %, а при оптимизации получить КПД энергоблока на уровне 50 %. Развитие таких блоков позволит увеличить долю твердого топлива в топливном балансе ТЭС.

Одним из перспективных направлений исследования тепловых схем энергоблоков на ССКП является оптимизация схемы установки питательных насосов. Возможными вариантами организации питательной установки могут быть одноподъемная и двухподъемная схемы [2]. При этом необходимо отметить вариации по типу привода питательных насосов, а также схемы включения приводных турбин в случае с турбоприводом питательного насоса.

В процессе анализа одно- и двухподъемных схем был выявлен ряд существенных отличий, касающихся параметров тракта высокого давления. В случае одноподъемной схемы подогреватели высокого давления находятся в условиях как высоких температур со стороны греющего теплоносителя, так и высоких давлений со стороны нагреваемого теплоносителя. При использовании двухподъемной схемы включения питательных насосов давление, развиваемое насосами первого подъема, значительно ниже, однако работа насоса второго подъема находится в условиях более высоких температур, чем в случае одноподъемной схемы.

Таким образом, исследуемые тепловые схемы необходимо анализировать как с позиции тепловой экономичности, так и с позиции возможного конструктивного исполнения.

### **Литература**

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р.
2. **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.

## Секция 46

# КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент С.В. Мезин

Секретарь секции — ассистент С.Ю. Бурцев

И.И. Белозёрова, студ.; рук. В.Ф. Кузицин, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ПАРООХЛАДИТЕЛЕМ

При использовании поверхностных пароохладителей динамика опережающего участка оказывается хуже, чем для впрыскивающих пароохладителей. На рис. 1 приведены кривые разгона для участка регулирования температуры пара котла БМ-35-РФ ТЭЦ МЭИ: а) для температуры пара за пароперегревателем ( $T_{пп}$ ); б) для температуры пара за пароохладителем ( $T_{по}$ ). Помимо инерционности, сигнал по  $T_{по}$  для этого котла оказывается недостаточно стабильным из-за образования застойных зон в области термомпары.

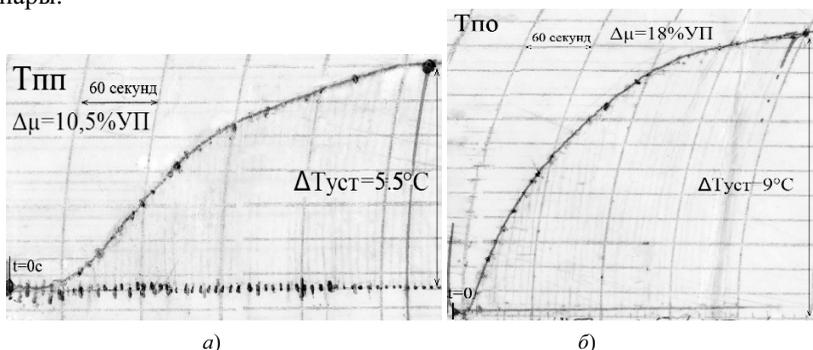


Рис. 1. Кривые разгона для температуры пара за пароперегревателем (а) и за пароохладителем (б)

Данные аппроксимируются следующим образом: строится касательная к точке перегиба, определяются параметры системы и строится переходная характеристика модели. Экспериментальная и аппроксимирующая характеристики должны совпадать в точке перегиба, иметь в этой точке одина-

ковый наклон и совпадать по первой производной. Передаточные функции по основному ( $W_{\mu y}$ ) и опережающему каналам ( $W_{\mu z}$ ):

$$W_{\mu y}(S) = \frac{0,52e^{-11,5s}}{(42,2s+1)^3} ; \quad W_{\mu z}(S) = \frac{0,5e^{-1,27s}}{(57,45s+1)(8,96s+1)} .$$

Рассмотрены варианты: 1) двухконтурная АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором с расчетом по методу последовательных приближений с поочередной настройкой контуров; 2) с расчетом по методу «компенсированной настройки»; 3) с применением динамического преобразователя вместо дифференциатора; 4) одноконтурная АСР с ПИД-регулятором. На основе сравнения переходных процессов сделаны выводы об эффективности и области применения рассмотренных вариантов.

*И.А. Болдинов, асп.; рук. Г.П. Плетьов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АВТОНАСТРОЙКИ АСР СО СЛОЖНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ**

Для стабилизации инерционных параметров на отечественных энергоблоках [1] широкое распространение получила так называемая система регулирования со сложным дифференциатором [2]. За время применения сложных дифференциаторов был проведен ряд исследований, направленных на выработку методологии настройки схемы, однако вопрос об автоматизации этого процесса по-прежнему остается актуальным.

Были рассмотрены различные методы адаптивной настройки АСР, из которых наиболее подходящим стал метод настройки с контролем резонансных свойств АСР при помощи ГСК [3]; рассмотрена возможность его применения. Проверка работоспособности данного метода выявила основной его недостаток, а именно: сильную зависимость качества полученной настройки от соотношения инерционностей каналов объекта. Применительно к АСР со сложным дифференциатором проведена модификация алгоритма автоматизированной настройки таким образом, чтобы устранить этот недостаток. Показана возможность упрощения расчета оптимальных параметров сложного дифференциатора. Это позволило разделить расчет параметров настройки и избавило от необходимости поддержания заданного соотношения постоянной времени сложного дифференциатора и резонансной частоты во время настройки, т. е. расширить диапазон объектов, для которых применим описанный метод.

Как показали опыты на имитационной модели замкнутой системы в ПТК SPPA-T3000, сокращение времени настройки (а значит, и возмущения технологического процесса) с применением предлагаемого алгоритма может достигать 30 % по сравнению с используемым в настоящее время методом настройки, применяемым наладчиками.

### **Литература**

1. **Усовершенствование** автоматических систем регулирования технологических параметров энергоблоков / В.А. Биленко, Э.Э. Микушевич, Д.Ю. Никольский и др. // Теплоэнергетика. 2008. № 10.
2. **Биленко В.А., Шавочкин И.А.** Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2006. № 4.
3. **Ротач В.Я., Кузищин В.Ф., Ключев А.С.** Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1984.

*С.Ю. Бурцев, асп.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПГУ ПРИ УЧАСТИИ ЕЕ В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

С появлением реального рынка электроэнергии и мощности повысились требования к качеству их генерации на электростанциях, в первую очередь к частоте и напряжению в сети. Все больше внимания уделяют эксплуатационным характеристикам парогазовых установок утилизационного типа (ПГУ-У) с высокой долей мощности высокотемпературных газовых турбин, которые имеют ряд преимуществ перед традиционными энергоблоками.

Недостаток высокоманевренных энергоблоков, ограниченные возможности тепловых станций по участию в регулировании нагрузки и ряд других факторов склоняют диспетчерские службы энергосистем к привлечению более экономичных ПГУ к нормированному первичному регулированию частоты (НПРЧ) и мощности энергосистемы.

Известные ограничения на величину регулировочного диапазона ПГУ (экономичность и надежность оборудования, экологические показатели), в котором она может принимать участия в НПРЧ, целиком или частично сняты за счет возможных путей его расширения [1].

В настоящей работе исследуется оптимальное распределение нагрузки между турбоагрегатами (газовой и паровой турбиной) блока ПГУ-450 при его участии в НПРЧ исходя из условия повышения экономичности блока и соблюдения ограничений, накладываемых заводом-изготовителем на технологические параметры оборудования ПГУ [2].

КПД энергоблока ПГУ-450 складывается из КПД двух газовых турбин (ГТ) и КПД паровой турбины (ПТ). Учитывая наименьший вклад в экономичность блока ПТ и невысокую его зависимость от исходной нагрузки в отличие от сильного снижения КПД ГТ при снижении нагрузки блока, следует предположить, что при участии блока в НПРЧ наиболее выгодно сначала воздействовать на регулирующие органы ПТ при сбросе нагрузки и наоборот – при наборе нагрузки.

### **Литература**

1. **Аракелян Э.К., Хуршудян С.Р., Бурцев С.Ю.** Способы расширения регулировочного диапазона ПГУ-450 и их сравнительная оценка по экономичности // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 2 (88).
2. **Аракелян Э.К., Бурцев С.Ю.** Оптимизация режимов работы ПГУ при участии ее в регулировании мощности и частоты в энергосистеме // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 8–12 сентября 2014 г. В 5 т. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т. 2.

*В.В. Гурьянова, студ.; рук. В.М. Парчевский, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХМЕРНОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР-1000**

Влажность пара, поступающего на турбину энергоблока с реактором ВВЭР-1000, является одним из важнейших параметров, влияющих на экономичность и надежность его работы. Во время пусконаладочных испытаний для каждого из четырех парогенераторов (ПГ) путем сложных и трудоемких экспериментов определяется сепарационная характеристика (СХ)  $\omega(h)$ , устанавливающая зависимость влажности насыщенного пара  $\omega$  от уровня воды в ПГ  $h$  при номинальной нагрузке. По известной СХ определяется требуемое значение уровня.

Между тем при строительстве АЭС заказчик требует предоставления готового тренажера для подготовки персонала за год-два до пуска АЭС. Тренажер строится на основе математической модели энергоблока, в том числе и его системы управления, включающей СХ. Поэтому необходимо располагать расчетным методом получения СХ, причем не только одномерной, но и двухмерной (ДСХ) в виде  $\omega(h, D)$ , где  $D$  – паровая нагрузка ПГ. Учет паровой нагрузки вызван тем, что АЭС все более активно вовлекаются в режим регулирования частоты и мощности, а нагрузка ПГ существенно влияет на влажность пара.

В данной работе предложен достаточно простой «инженерный» метод расчетного определения ДСХ, который может быть использован на стадии проектирования и строительства АЭС с последующей корректировкой (если это необходимо) во время пусконаладочных работ на реальном объекте. В основу расчета положена известная формула [1]

$$\omega_{oc} = M \cdot 10^{-4} (w'')^{2,76} / (h_{oc})^{2,3}.$$

Все параметры, входящие в выражение для  $\omega_{oc}$ , выражались через  $h$  и  $D$ . Поверхность испарения разбивалась на 4 зоны, для каждой из которых определялось значение влажности. Влажность на выходе из ПГ определялась как средневзвешенная из четырех зон.

### **Литература**

1. **Тепловые и атомные** электрические станции: Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В условиях повышения требований к экономической эффективности работы систем управления одним из существенных аспектов является надежность этих систем. В реальных условиях эксплуатации большинство АСУ необходимо рассматривать как восстанавливаемые системы и определять для них соответствующие этому классу систем показатели надежности (например, функцию готовности). Традиционными для расчета надежности таких систем являются метод переходных вероятностей (МПВ) и метод переходных интенсивностей (МПИ) [1], представляющие процесс перехода системы из состояния в состояние как марковский с дискретным и непрерывным временем соответственно.

МПИ для своей реализации требует решения системы дифференциальных уравнений (часто большой размерности). МПВ приводит к необходимости многократного решения системы линейных алгебраических уравнений. Значительно упростить расчеты позволяет применение интегральных преобразований [2]: Лапласа для МПИ и z-преобразования для МПВ. При этом запись исходных систем в матричном виде приводит к решениям, показывающим единство переходных методов:

$$\mathbf{V}(s) = \mathbf{P}(0)[s\mathbf{I} - \mathbf{M}]^{-1}$$
$$\text{и } \mathbf{V}(z) = \mathbf{P}(0)[\mathbf{I} - z\mathbf{M}]^{-1},$$

где  $\mathbf{P}(0)$  – вектор начального состояния;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица;  $\mathbf{M}$  – матрица интенсивностей переходов (в МПИ) или матрица переходов (в МПВ);  $s$  – оператор Лапласа;  $\mathbf{V}(s)$  – преобразование Лапласа вектора вероятностей нахождения в состояниях в момент времени  $t$   $\mathbf{P}(t)$ ;  $\mathbf{V}(z)$  – z-преобразование вектора вероятностей нахождения в состояниях через  $i$  дискретных интервала времени  $\mathbf{P}(i)$ .

Применение обратных преобразований позволяет найти  $\mathbf{P}(i)$  и  $\mathbf{P}(t)$ , что (после разделения всех состояний на работоспособные и неработоспособные с учетом принятого критерия отказа) дает возможность записать выражение для функции готовности системы. Выделение стационарной части полученного решения позволяет рассчитать коэффициент готовности.

### Литература

1. Тетеревков И.В. Надежность систем автоматизации: учеб. пособие. Иваново, 2007.
2. Рогач В.Я. Теория автоматического регулирования: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

*Ю.С. Заварзина, студ.; рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОЧНОГО ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

Данная работа посвящена вопросам разработки БПУ в проектах российских АЭС на современном этапе.

В настоящее время в атомной энергетике используются варианты БПУ, предусматривающие одновременное использование двух способов управления: на традиционных индивидуальных средствах и дисплейного как резервного [1]. Оператору приходится действовать в условиях двух типов человеко-машинного интерфейса (ЧМИ), что усложняет его работу и приводит к дополнительным ошибкам в его действиях. Таким образом, при разработках БПУ необходимо стремиться к тому, чтобы работа операторов проходила в условиях одного ЧМИ в максимально возможных объемах и времени.

Учитывая недостатки нынешнего способа управления, в работе при проектировании человеко-машинного интерфейса предлагаю использовать дисплейный способ управления БПУ, когда насосы, вентиляторы и арматура включаются и отключаются, закрываются и открываются с применением компьютерной «мышки». При этом всю необходимую информацию операторы получают с экранов дисплеев автоматизированных рабочих мест (АРМ).

При некоторых минусах нового дисплейного способа управления, одно из основных его преимуществ – уменьшение количества пультов и панелей с традиционными элементами. Дисплейный способ позволяет значительно усилить интеграцию информационного и управленческого процесса, резко увеличивает объемы диагностики оборудования, уменьшает отказоустойчивость БПУ как целостной системы контроля и управления атомным энергоблоком [2]. Оператор, действуя в условиях одного типа ЧМИ, совершает меньше ошибок.

В перспективе стоит задача проектирования БПУ с полным отказом от панелей и пультов с наборами индивидуальных элементов, где будут применяться практически полностью компьютеризированные залы управления.

### **Литература**

1. **Анохин А.Н., Острейковский В.А.** Вопросы эргономики в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. **Зверков В.В.** Блочный пункт управления новых АЭС. М.: МИФИ, 2013.

*В.Р. Захарова, студ.; рук. Т.Е. Щедеркина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Эффективное управление технологическим объектом с использованием методов теории автоматического управления возможно лишь тогда, когда известно математическое описание этого объекта. Поэтому построение математического описания – идентификация объекта управления – это важнейший этап создания любой автоматизированной или автоматической системы управления.

Методы идентификации объектов управления делятся на активные и пассивные. Активные методы идентификации основаны на проведении специальных заранее спланированных экспериментов, позволяющих проводить целенаправленное изучение исследуемых свойств процесса. Пассивные методы предполагают изучение технологического процесса в режиме нормальной работы.

В работе проведено исследование активного метода идентификации динамики объекта управления. С этой целью осуществлено моделирование динамики теплового объекта, находящегося под действием случайного возмущения. Получены результаты модельного эксперимента в виде серии оценок переходных характеристик объекта и проведена обработка полученных результатов с известной точностью и достоверностью. В качестве оценки точности принят доверительный интервал на истинную переходную характеристику, а в качестве достоверности полученного результата использованы две различные методики, изложенные в [1–3]. Осуществляется сравнительный анализ полученных результатов.

Проведен пассивный модельный эксперимент с целью идентификации динамики объектов управления в условиях случайных возмущений. Получены реализации входных и выходных процессов в режиме нормального функционирования объекта управления. Рассчитываются вероятностные характеристики и определяется динамика исследуемого объекта.

В заключение исследования сделаны выводы о предпочтительности применения того или иного метода.

### **Литература**

1. **Пикина Г.А., Щедеркина Т.Е., Волгин В.В.** Идентификация объектов управления в теплоэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
2. **Рогач В.Я.** Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
3. **Щедеркина Т.Е., Волгин В.В.** Экспериментальное определение моделей статики и динамики объектов управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

*Н.А. Зуев, М.С. Смирнов, студенты; рук. И.В. Тетеревков, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

Повсеместное внедрение микропроцессорных средств управления и SCADA-систем в теплоэнергетике сопровождается не только ростом функциональных возможностей АСУ, но и повышением требований к качеству регулирования процессов. Это приводит к необходимости либо провести перенастройку элементов существующих систем, работающих на основе жестких законов регулирования, либо к переходу на применение нетиповых классов систем, например, нейронных сетей или систем управления на базе нечеткой логики [1]. При этом существенные проблемы создает ограниченность применяемых математических методов, зачастую не обеспечивающих устойчивость вычислительного процесса.

Значительный интерес представляют так называемые генетические алгоритмы (ГА) [2], изначально предназначенные для распознавания образов и организации поиска экстремума в многомерных задачах оптимизации.

ГА реализуют поиск решения, имитируя процесс естественного отбора в ходе эволюционного развития. При этом в отличие от классических подходов к оптимизации (например, при использовании градиентных методов) вычислительный процесс происходит в более устойчивом режиме, менее чувствительном к особенностям рассматриваемой целевой функции. Выход из области локального экстремума может быть обеспечен за счет использования операции мутации.

Авторами разработаны программные средства, позволяющие на основе ГА провести настройку АСР с учетом заданного функционала, учитывающего набор различных показателей качества (с заданием весовых коэффициентов, соответствующих степени значимости каждого показателя). При этом на начальном этапе (также с использованием ГА) проводится идентификация объекта управления с построением модели в виде разностного уравнения. Получение модели дает возможность осуществить настройку системы с использованием симулятора VisSim, тем самым значительно сократив время ее реальной наладки. В докладе представлены полученные результаты, а также даны общие рекомендации по применению ГА.

### **Литература**

1. **Методы** робастного, нейронечеткого и адаптивного управления: учебник / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
2. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.

## **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ**

Оптимизация находит применение везде: в науке, технике и в любой другой области человеческой деятельности.

Непосредственной целью оптимизации является получение наилучших результатов при соответствующих условиях.

При постановке задачи оптимизации необходимо:

- наличие объекта и цели оптимизации;
- наличие ресурсов оптимизации, т.е. возможность выбора значений некоторых параметров оптимизируемого объекта (объект должен обладать определенными степенями свободы – управляющими воздействиями);
- возможность количественной оценки оптимизируемой величины, так как только в этом случае можно сравнивать эффекты от выбора тех или иных управляющих воздействий;
- учет ограничений.

В настоящее время в задачах имитационного моделирования все шире применяются численные методы оптимизации. Примером могут служить программы Opt(...) и MGA(...) в MathCAD [1].

Данные алгоритмы разработаны и находят применение в нахождении параметров сложных схем регулирования (настройки регулятора с большим числом параметров).

Однако, как показывает опыт, прямое использование этих алгоритмов для оптимизации регуляторов не всегда дает удовлетворительные результаты.

Алгоритмы оптимизации по назначению имеют два основополагающих и основных свойства: степень точности и время достижения оптимума. Оба этих свойства зависят от настроечных параметров алгоритма оптимизации. В настоящей работе проведено исследование некоторых распространенных поверхностей функции цели, а также влияние установочных параметров на качество работы алгоритмов оптимизации.

В данной работе сделано предварительное исследование поверхности функции цели, выбор и настройка функции ограничений на оптимальное решение и проведены расчеты для нескольких настроечных параметров алгоритма оптимизации.

### **Литература**

1. **Андрюшин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.** Управление и инноватика в теплоэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

*Ю.С. Колосова, А.А. Яблоков, аспиранты;  
рук-ли В.М. Захаров, к.т.н., проф. ;  
А.В. Кондрашин, к.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ОКОН С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ ЭКРАНАМИ И СОЛНЕЧНЫМИ МОДУЛЯМИ**

В приказе Минрегионразвития от 28 мая 2010 года № 262 приводятся требования по снижению потребления энергоресурсов в здании не менее чем на 40 % по отношению к базовому уровню с 1 января 2020 года.

Внедрение инновационных энергоэффективных технологий в строительстве и переоснащении зданий, повышение их энергоэффективности является одной из первоочередных задач. Достичь необходимые показатели энергоэффективности можно только с использованием современных систем автоматизации и диспетчеризации.

В целях снижения затрат на теплоснабжение зданий при поддержании нормируемых параметров микроклимата разработана система управления отоплением здания с применением энергосберегающих окон, режимом дежурного отопления и солнечными модулями.

В результате использования разработанной системы теплоотражающие экраны в оконном блоке опускаются в темное время суток и во время отсутствия людей по заданному графику или по сигналу от датчика наружной освещенности в зависимости от выбранного алгоритма управления, что приводит к уменьшению тепловых потерь и увеличению температуры воздуха внутри помещения. В режиме дежурного отопления поддерживается минимальная температура, рассчитываемая в зависимости от влажности воздуха внутри помещения исходя из условий недопущения образования конденсата на поверхности ограждающих конструкций [1].

Данная разработка поможет значительно снизить потребление ТЭР как в ЖКХ, общественно-административных зданиях, так и в промышленном секторе. Внедрение разработанных технологий придаст новый импульс в развитии «зеленого» строительства и систем «умных» домов.

### **Литература**

1. **Двойной** энергетический эффект в системах теплоснабжения зданий от использования автоматизированных энергосберегающих окон для различных регионов России / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, А.А. Яблоков и др. // Вестник ИГЭУ. 2014. № 3.

*К.К. Колчев, асп.; рук-ли С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);  
A. Bode, Dipl.-Ing.(Univ.) (Siemens AG, Эрланген, Германия)*

## **МЕТОД ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ARIMA-МОДЕЛЕЙ**

Работа систем управления и диагностики тепловых и атомных электростанций невозможна без информации об объекте управления. Информация формируется в результате многочисленных измерений технологических параметров. Оценка достоверности измерительной информации, обнаружение, удаление и замена недостоверных наблюдений являются важными задачами, обеспечивающими повышение эффективности и надежности эксплуатации тепловых и атомных электростанций.

Недостоверные наблюдения являются следствием сбоев и отказов информационно-измерительных каналов (ИИК). Для оценки достоверности наблюдений применяются различные методы, которые обладают преимуществами и недостатками, ограничивающими сферу их применения [1].

В настоящем докладе предлагается метод оценки достоверности наблюдений, построенный на основе теории временных рядов и моделей авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA-модели) [2, 3].

Теория временных рядов предлагает различные методы построения математических моделей временных рядов. Математическая модель отражает зависимости между наблюдениями данного временного ряда и, в случае более сложных моделей, наблюдениями дополнительных временных рядов. С помощью математической модели по наблюдениям временного ряда можно выполнить прогнозирование его будущих значений.

Предлагаемый метод оценки достоверности наблюдений комбинирует различные подходы к прогнозированию временных рядов. Метод исключает из анализа интервалы, обладающие существенной нестационарностью, и оценивает достоверность остальных наблюдений. Предлагаемый метод учитывает недостатки известных методов оценки достоверности наблюдений и является универсальным по отношению к различным видам сбоев и отказов ИИК (выбросы, провалы, замирание и дребезг ИИК).

### **Литература**

1. **Колчев К.К.** Обзор и сравнительный анализ методов обнаружения недостоверных наблюдений технологических параметров системой АСУ ТП электростанции // Энергосбережение – теория и практика: Труды VII Междун. школы-сем. молодых ученых и специалистов. В 2 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 2.
2. **Бокс Дж., Дженкинс Г.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир, 1974.
3. **James D. Hamilton.** Time Series Analysis. Princeton.: Princeton University Press, 1994.

*К.С. Коротеев, студ.; С.Ю. Бурцев, асп.;  
рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПГУ**

Обладая высокой экономичностью и ограниченным регулировочным диапазоном, зависящим от температуры наружного воздуха, парогазовые установки (ПГУ) проектируются для прохождения базовой части графиков нагрузки с ограниченным числом переменных и остановочно-пусковых режимов.

Возможные пути расширения регулировочного диапазона [1] открывает более высокий потенциал привлечения ПГУ к прохождению переменных частей графика нагрузки с характерными высокими скоростями изменения нагрузки.

При работе энергоблока ПГУ в составе станции со сложным составом оборудования по диспетчерскому графику с одними станционными условиями возникает задача распределения нагрузки как между энергоблоками станции, так и между оборудованием самой ПГУ.

При этом встает вопрос последовательности и величины нагружения турбоагрегатов с учетом технико-экономических показателей блока.

Сложность решения указанных выше проблем во многом определена отсутствием экспериментальных данных и сложностью моделирования и расчета показателей газотурбиной установки (ГТУ), котлов-утилизаторов (КУ) и паровой турбины (ПТ) на частичных нагрузках.

С целью разработки оптимальной структуры автоматической системы регулирования (АСР) мощности ПГУ на тренажере энергоблока ПГУ-450, разработанного ОАО «Тренажеры для электростанций» [2] были получены переходные процессы изменения мощности ГТ и ПТ для последующего анализа и выработки требований к синтезируемой АСР мощности.

АСР мощности ПГУ создается на том предположении, что работа блока в режимах разгрузки-нагрузки по диспетчерскому графику с первоочередным воздействием на регулирующие клапана ПТ будет более экономична, чем при прохождении переменной части графика за счет воздействия на регулирующие органы ГТ.

### **Литература**

1. **Аракелян Э.К., Хуршудян С.Р., Бурцев С.Ю.** Способы расширения регулировочного диапазона ПГУ-450 и их сравнительная оценка по экономичности // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 2 (88).
2. **Обуваев А.С.** Разработка и исследование аналитической модели ПГУ-450: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 146 с.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КОТЕЛ ПГУ-450Т КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В публикации [1] приведена технологическая схема дополнительного котла (ДК) для ПГУ-450Т, позволяющего осуществлять работу установки в технологическом разрыве регулировочного диапазона.

Принципиальная схема ДК, позволяющая обеспечить необходимую температуру острого пара, приведена на рис. 1. Для реализации системы управления ДК необходимо определить регулируемые, регулирующие, возмущающие параметры и их взаимное влияние.

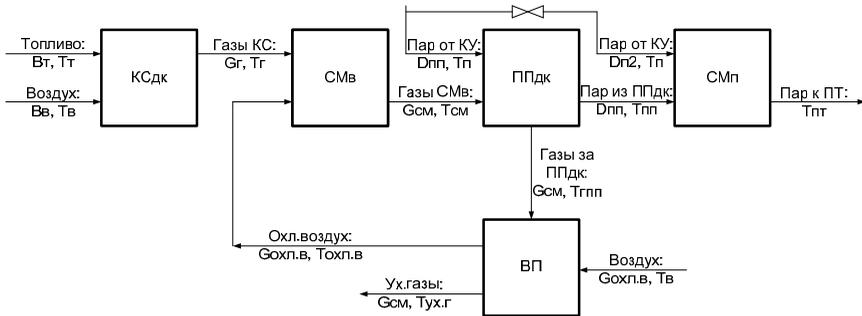


Рис. 1. Принципиальная схема дополнительного котла:

КСдк – камера сгорания дополнительного котла; СМв – смеситель газов из КСдк и охлаждающего воздуха; ППдк – пароперегреватель дополнительного котла; СМп – смеситель подогретого пара и пара от КУ; ВП – воздухоподогреватель

В связи с тем что дополнительный котел устанавливается после основных КУ ПГУ-450Т, было принято, что изменение режима работы ДК не влияет на работу КУ. При таком условии все изменения расхода и параметров пара высокого давления за КУ можно считать внешними возмущениями для ДК. При этом регулируемыми величинами будут:

- температура  $T_{п.т}$  пара перед паровой турбиной;
- соотношение топливо-воздух в камере сжигания ДК;
- равенство давлений и соотношение расходов пара, идущего через дополнительный пароперегреватель и паром, идущим от КУ сразу к ПТ;
- температура  $T_{см}$  греющего теплоносителя на выходе из смесителя;
- температура дымовых газов на выходе из ДК.

Кроме того, случайным внешним возмущением для ДК является изменение температуры окружающего воздуха.

### Литература

1. Коршикова А.А. Исследование метода расширения регулировочного диапазона энергоблока ПГУ-450Т // Энергосбережение. Теория и практика: Тез. докл. в 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 1.

В.С. Леонтьев, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## СОЗДАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВТОРИЧНОГО ПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА ТГМП-314

Выполнена разработка математической модели с сосредоточенными параметрами для тепловых процессов вторичного пароперегревателя котла ТГМП-314. Температура перегрева регулируется шунтированием первой ступени, как показано на структурной схеме (рис. 1). Объект моделирования включает две ступени поверхности нагрева, трехходовой клапан, смеситель, четыре паровых коллектора и две термопары [1].

Получены аналитические выражения передаточных функций по основному и вспомогательному каналам, предназначенных для синтеза двухканальной системы регулирования вторичного перегрева [2].

Так, для основного канала передаточная функция имеет вид:

$$W_{\mu\theta}(p) = \left[ D_0 \mu_0 W_{D\theta_1^k}(p) W_k(p) - (\theta_1^k - \theta_1^H)_0 \right] W_{\theta_{II}^H\theta}(p) W_k^2(p) W_{TII}(p),$$

где  $W_{D\theta_1^k}(p)$ ,  $W_{\theta_{II}^H\theta}(p)$ ,  $W_k(p)$ ,  $W_{TII}(p)$  – передаточные функции первой (канала «расход пара – температура на выходе») и второй (канала «температура пара на входе – температура на выходе») ступеней пароперегревателя, коллекторов и измерительной термопары; индекс «0» относится к значениям параметров в исходном статическом режиме.

Собраны исходные числовые данные и проведены расчеты частотных характеристик каналов, подтвердившие, по крайней мере, структурную достоверность разработанной модели.

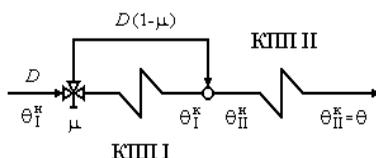


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

### Литература

1. **Инструкция** для прямоточного котла ТГМП-314П, ст. № 3, 4, 5 ТЭЦ-26. URL: [http://www.kafedra.asutp.lclients.ru/sau/TGMP\\_314\\_instruction.pdf](http://www.kafedra.asutp.lclients.ru/sau/TGMP_314_instruction.pdf).
2. **Пикина Г.А.** Математические модели технологических объектов: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

Я.В. Лисова, И.А. Рябиков, студенты;  
рук. Е.Д. Маршалов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Динамические свойства датчиков оказывают влияние на параметры настройки автоматических регуляторов и соответственно на качество работы АСУТП в целом. Поэтому задача исследования динамических свойств датчиков температуры является актуальной и востребованной. Целью работы является исследование датчиков температуры и определение их динамических характеристик.

Наиболее распространенными в промышленности датчиками температуры являются термопреобразователи сопротивления (ТС). В нашей работе использовались платиновые термопреобразователи сопротивления с номинальной статической характеристикой 100П [1].

Эксперименты проводились по следующей методике. В начале термопреобразователи сопротивления подключались к входам АЦП регистратора РМТ-59 [2] и размещались на лабораторном столе. На калибраторе температуры ЭЛЕМЕР-КТ-650 [3] задавалось требуемое значение температуры. Эксперименты проводились при следующих значениях температуры: 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 °С. После этого датчик температуры помещался в калибратор температуры КТ-650 и фиксировалось время начала переходного процесса с точностью до одной секунды. В результате обработки 130 переходных характеристик, полученных для исследуемых термопреобразователей сопротивления, найдены оценки семейств переходных характеристик изменения температуры, приведенных к диапазону 0÷100 %, для различных термопреобразователей сопротивления. Полученные результаты представлены на рис. 1. Как видно из графиков, при помещении датчиков в одинаковую технологическую среду с одинаковой скоростью обтекания датчика технологической средой большое влияние на динамические характеристики оказывает диаметр монтажной части.

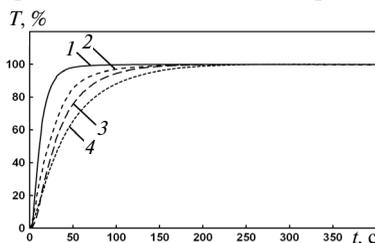


Рис. 1. Динамические характеристики датчиков температуры для диаметров монтажной части:

1 — 4 мм; 2 — 6 мм; 3 — 8 мм; 4 — 10 мм

## Литература

1. **Термометры** сопротивления из платины и меди. Паспорт. М.: ООО НПП «Элемер», 2011.
2. **Регистратор** многоканальный технологический РМТ-59. Руководство по эксплуатации. М.: ООО НПП «Элемер», 2009.
3. **Калибратор** температуры эталонный КТ-650. Паспорт. М.: ООО НПП «Элемер», 2004.

*С.Н. Любимов, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ФУНКЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Атомные электростанции являются производством с повышенным уровнем опасности, поэтому на них очень тщательно относятся к безопасности как при эксплуатации, так и при проектировании. Наиболее важным является этап проверки систем контроля управления систем управления (СКУ СУ). Большинство данных систем предполагают срабатывание по изменению технологических параметров, алгоритмы срабатывания которых приведены на технологических схемах функций безопасности (ФБ). ФБ срабатывают при выходе из диапазона нормальной эксплуатации одного или нескольких технологических параметров, контролируемых данной функцией. Все диапазоны технологических параметров, продиктованы требованиями к надежности и качеству работы оборудования, недопущению выхода объекта из надежной и безопасной эксплуатации реактора и атомной станции в целом [1].

Алгоритм, который рассматривается в данном докладе, является способом диагностики всей ФБ и ее связей с другими функциями. Первым шагом алгоритма проверки функции является разработка пошаговой методики проверки ФБ. Вторым шагом является привязка кодов ККС к результатам реакции системы на сигналы, они подаются согласно принятой методике. Третий шаг – это создание файла отклика системы на подаваемые сигналы. Четвертый этап заключается в модельном запуске методики испытаний на реальном оборудовании как на испытательном полигоне, так и непосредственно на атомной станции. Пятый этап алгоритма это – сравнение ожидаемых результатов с полученными на полигоне. В результате сравнения данных можно судить о правильности реализации ФБ в оборудовании атомной станции. Этот метод позволяет проверить и выявить ошибки и недочеты, которые невозможно выявить при графическом методе проверки.

### **Литература**

1. МЭК 61226-2011. Атомные электростанции. Системы контроля и управления важные для безопасности. Классификация функции контроля и управления.

Нгуен Тиен Санг, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ПРОГРАММА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА

В разрабатываемой программе, предназначенной для проведения лабораторных занятий по курсу «Моделирование систем управления» [1] (рис. 1), предусмотрена возможность расчета статических и комплексных частотных характеристик распределенных (РП) и сосредоточенных (СП) моделей тепловых процессов всех типов поверхностей теплообмена реальных энергетических объектов – конвективных с однофазными теплоносителями, конвективных с наружным теплоносителем на линии насыщения и радиационных. Теплоносителем внутри труб служит вода или водяной пар. Пользователю предлагается 41 вариант исходных данных поверхностей прямооточного ТГМП-314 и барабанного БКЗ-320 котлов и двух типов парогенераторов блоков ВВЭР.

Все расчеты и оперативная визуальная информация осуществляются в среде Microsoft Visual 2010 Professional C# (С-шарп).

В докладе освещается раздел статического моделирования изменения температур теплоносителей и стенки труб по длине. В основе расчетов лежат нелинейные модели с распределенными параметрами всех сред (РП-РП-РП модель) и модель с сосредоточенными параметрами стенки (РП-СП-РП модель). Нелинейность модели отражена вычислением на каждом шаге новых значений теплоемкости и плотности внутреннего теплоносителя. Для этого в программу включены формулы расчета термодинамических параметров воды и водяного пара.

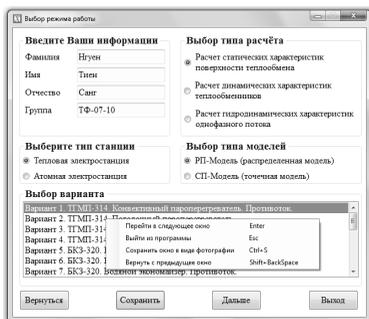


Рис. 1. Интерфейс диалогового окна программы

Программу можно использовать не только в учебном процессе, но и в иных инженерных и научных работах, для чего имеется возможность проведения расчетов с данными пользователя.

### Литература

1. Пикина Г.А. Математические модели технологических объектов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*А.А. Образцов, А.А. Старостин, студенты;  
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ**

В настоящее время экстремальные регуляторы все чаще используются для управления различными объектами.

Процессы связанного регулирования нагрузки и экономичности энергетических котлов с использованием экстремальных регуляторов состоят в регулировании расхода топлива и расхода воздуха. В связанной системе регулирования задатчик регулятора расхода воздуха через функцию режимной карты соотношения «топливо-воздух» соединен с источником сигнала по расходу топлива. В такой системе при работающем регуляторе нагрузки котла экстремальный регулятор, анализируя реакцию регулятора расхода топлива на изменения расхода воздуха, изменяет задание регулятору расхода воздуха таким образом, чтобы котел, вырабатывая заданное количество пара, потреблял минимальное количество топлива.

Необходимым условием работы экстремального регулятора расхода воздуха является устойчивость работы всех остальных регуляторов и чтобы работа экстремального регулятора не возбуждала колебаний.

Классическая постановка задачи оценки устойчивости в нелинейных системах изложена в [1, 2].

В данной работе приведены некоторые результаты исследования влияния задаваемой экстремальным регулятором скорости приближения к оптимальному значению расхода воздуха на устойчивость работы всех регуляторов котла.

### **Литература**

1. **Попов Е.П.** Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1983.
2. **Либерзон Л.М., Родов А.Б.** Системы экстремального регулирования. М.: Энергия, 1965.

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ВЫБРОСАМИ ОКСИДОВ АЗОТА

Для экономически грамотного управления выбросами оксидов азота на газомазутной ТЭС необходимо располагать для каждого котла специальной эколого-экономической характеристикой (ЭЭХ), связывающей эксплуатационные затраты на атмосфероохранное воздействие  $Z$ , паровую нагрузку котла  $D$  и массовый выброс оксидов азота  $m$ :  $Z(m, D)$ . Математическая формулировка задачи оптимального управления: имеются  $n$  котлов с известными, выраженными аналитически ЭЭХ:

$$Z_1(m_1, D_1), Z_2(m_2, D_2), \dots, Z_n(m_n, D_n), \quad (1)$$

имеются ограничения на допустимый суммарный выброс, определяемый значением ПДВ

$$M = \sum m_i, \quad (2)$$

и на выбросы отдельных котлов

$$m_1^{\min} \leq m_1 \leq m_1^{\max}, \dots, m_n^{\min} \leq m_n \leq m_n^{\max}. \quad (3)$$

Требуется определить значения  $m_1^{\text{опт}}, m_2^{\text{опт}}, \dots, m_n^{\text{опт}}$ , удовлетворяющие ограничениям (2), (3), при которых

$$Z = \sum Z_i(m_i, D_i) \rightarrow \min. \quad (4)$$

При решении вопроса о внедрении на ТЭС системы оптимального управления выбросами, решающей задачу нелинейного программирования (1)–(4), необходимо еще на проектной стадии получить информацию о границах гарантированного экономического эффекта от ее реализации. В качестве экономического эффекта (Э) рассматривается разность суммарных затрат на снижение выбросов (4) при базовом [1] и оптимальном вариантах управления:  $\mathcal{E} = Z^{\text{б}} - Z^{\text{опт}}$ . Задача решалась на примере ТЭС с пятью барабанными котлами, при этом оценивалось влияние на экономический эффект следующих параметров: значения  $M$  (2), количества котлов  $n$ , разброса диапазонов выбросов отдельных котлов ( $\Delta m_i = m_i^{\max} - m_i^{\min}$ ), разброса затрат на снижение выбросов отдельных котлов ( $\Delta Z_i = Z_i^{\max} - Z_i^{\min}$ ).

### Литература

1. РД 153-34.0-02.303-98. Инструкция по нормированию выбросов для тепловых электростанций и котельных. М.: Информэнерго, 1998.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ АСР

Нелинейной называется система, в состав которой входит хотя бы один элемент, линеаризация которого невозможна без потери существенных свойств системы в целом. Реальные системы, как правило, нелинейны, что обусловлено физическими свойствами объектов управления или присутствующими в системе нелинейными элементами [1].

В работе проводится анализ влияния нелинейностей на качество работы АСР температуры острога пара. С помощью пакета MatLab были смоделированы одноконтурная и двухконтурная АСР. Для анализа влияния нелинейностей были построены переходные процессы по каналу регулирующего воздействия, для которых определили прямые показатели качества регулирования и сделали соответствующие выводы [2].

Также в работе выполнен расчет АСР для трех режимов работы объекта. Настройки регулятора зависят от режимов работы объекта, и данная система является АСР с переменными параметрами. Несмотря на применение линейного закона регулирования, эта АСР нелинейна [3].

Были рассчитаны настройки регулятора для каждого режима работы. Далее подобрали компромиссные настройки, соответствующие первому режиму (рис. 1), и нашли показатели качества для всех режимов с данными настройками; сделали вывод, что качество регулирования ухудшается незначительно (рис. 2), таким образом, можно использовать компромиссные настройки.

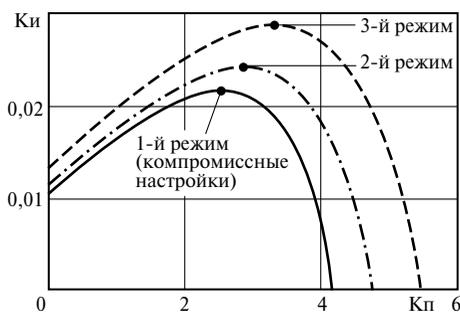


Рис. 1. Плоскость параметров настроек



Рис. 2. Переходные процессы

### Литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2008.
2. Панько М.А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCAD. М.: Издательство МЭИ, 2004.
3. Панько М.А. Нелинейные системы / под ред. М.А. Селезнёва. М.: МЭИ, 1983.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА В ЭНЕРГЕТИКЕ

Развитие техники за последние годы позволило существенно снизить стоимость частотно-регулируемого привода, что привело к расширению области применения и значительному увеличению их количества. Однако в настоящее время в России отсутствует комплексная методика оценки эффективности внедрения частотно-регулируемого электропривода в энергетике. Разработанные в 90-х годах прошлого столетия методики не учитывают опыта применения частотно-регулируемого привода в энергетике в современных условиях. Поэтому возникает необходимость в новой методике комплексной оценки эффективности внедрения частотно-регулируемого привода.

Разрабатываемая методика позволяет оценить эффективность применения частотно-регулируемого привода для разного типа оборудования. Учитывает технологические аспекты работы, особенности и ограничения, которые возникают при работе частотно-регулируемого привода.

Проведен расчет работы насоса, работающего с переменной частотой (рис. 1). Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров [1].

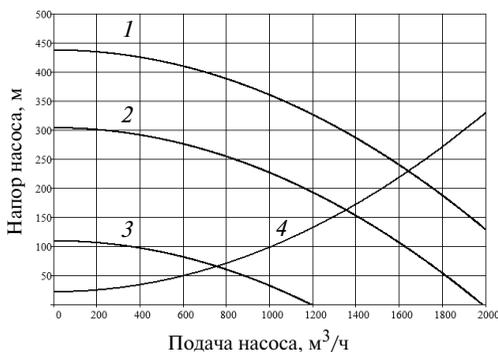


Рис. 1. График совместной работы насоса, работающего с переменной частотой, и трубопровода:

1 –  $n_1 = 3000$  об/мин; 2 –  $n_2 = 2500$  об/мин; 3 –  $n_3 = 1500$  об/мин; 4 – характеристика трубопровода

### Литература

1. Лезнов С.Б. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудовных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006.

*И.М. Сёмак, студ.; рук. В.С. Мухин, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СРЕДСТВАМИ SCADA TRACE MODE**

Автоматизированная система проведения экспериментов на объектах тепловой энергетики состоит из трех уровней. Первый (нижний) уровень представлен малоканальными контроллерами, выполняющими задачи сбора данных и управления отдельными агрегатами технологических систем. Второй (средний) уровень включает в себя промышленные контроллеры, организующие работу и синхронизацию контроллеров нижнего уровня. Третий (верхний) уровень представляет собой совокупность органов управления и средств предоставления информации о состоянии оборудования и параметров объекта в ходе эксперимента.

Для представления данных о ходе эксперимента используется верхний уровень объекта, однако можно реализовать вывод информации на отдельную операторскую станцию.

В основе создания программного обеспечения системы лежит применение компонентных технологий ActiveX и OPC. Чтобы иметь возможность неограниченно развивать интерфейс пользователя оператора эксперимента, можно воспользоваться ActiveX-технологией. При этом использование стандартных библиотек ActiveX-компонентов минимизирует их написание своими силами. Как средство интеграции SCADA с программируемыми приборами используется технология OPC.

Примем, что критерием эффективности функционирования комплекса для проведения и обработки результатов эксперимента служит отношение

$$N_{с.р} / N_{р.ф} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $N_{с.р}$  – количество программных средств разработки системы;  $N_{р.ф}$  – количество функций, реализуемых этими средствами.

Применение ПО верхнего уровня, созданного с помощью Trace Mode, освобождает от необходимости использовать специализированные средства обработки и визуализации экспериментальных данных, позволяя реализовать множество функций, требуемых от комплекса, стремясь при этом к минимуму принятого критерия эффективности [1]. Таким образом, использование Trace Mode для реализации верхнего уровня автоматизированной системы проведения экспериментов целесообразно.

### **Литература**

1. Герасимов А.В., Титовцев А.С. SCADA система Trace Mode 6. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2011.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АСР С УПРЕДИТЕЛЕМ СМИТА В MATLAB

Тепловые объекты требуют высокого качества регулирования, но они обладают инерционностью. С каждым годом растет интерес промышленности к повышению качества управления такими объектами, чего можно достигнуть, например, за счет применения упредителя или предиктора Смита. Целью данной работы является смоделировать АСР с предиктором Смита в программе MatLab и выполнить анализ ее работы с целью определения целесообразности дальнейшей ее реализации в системе CODESYS.

Была экспериментально получена кривая разгона реального теплового объекта – электронагревателя, по ней была получена модель объекта и настройки ПИД-регулятора [1] для одноконтурной АСР с данным объектом [2]. В MatLab были смоделированы одноконтурная АСР и АСР с предиктором Смита для сравнения качества регулирования. В обеих АСР было нанесено ступенчатое возмущение по каналу регулирования и по каналу задания. Полученные процессы показаны на рис. 1 и 2.

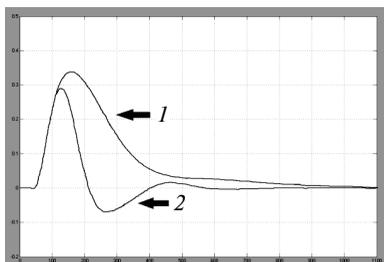


Рис. 1. Процессы по каналу регулирования:

1 – АСР с упредителем Смита; 2 – одноконтурная АСР

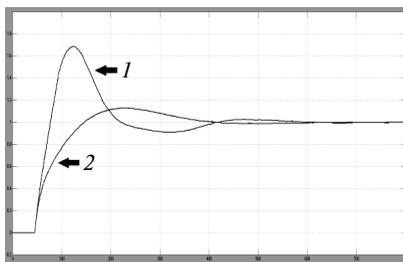


Рис. 2. Процессы по каналу задания:

1 – одноконтурная АСР; 2 – АСР с упредителем Смита

На рис. 1 представлены процессы по каналу регулирования. Видно, что в АСР с упредителем Смита немного увеличивается динамическое отклонение и отсутствует колебательность, последнее в некоторых системах предпочтительно. На рис. 2 представлены процессы по каналу задания. Видно, что в системе с упредителем Смита динамическое отклонение и длительность процесса меньше, чем в одноконтурной АСР с ПИД-регулятором. Таким образом, можно считать применение предиктора целесообразным.

### Литература

1. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4.
2. Панько М.А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCAD. – М.: Издательство МЭИ, 2004.



## НЕЛИНЕЙНАЯ СТАТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА

На рис. 1 приведен фрагмент структурной схемы парового котла, опубликованной в [1], на котором показаны нелинейные свойства процесса горения. Для статической части модели в работе использована следующая зависимость:

$$Q_T(B_T, V_B) = \alpha_0 B_T + \alpha_1 (\alpha_2 B_T - \alpha_3 V_B)^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коэффициенты, определяющие калорийность топлива и состояние оборудования котла.



Рис. 1

Выражение (1) использовано для расчета плоскости параметров управления и оптимизации котла ДКВР-6,5 (рис. 2, а; рис. 2, б – 3D-поверхность).

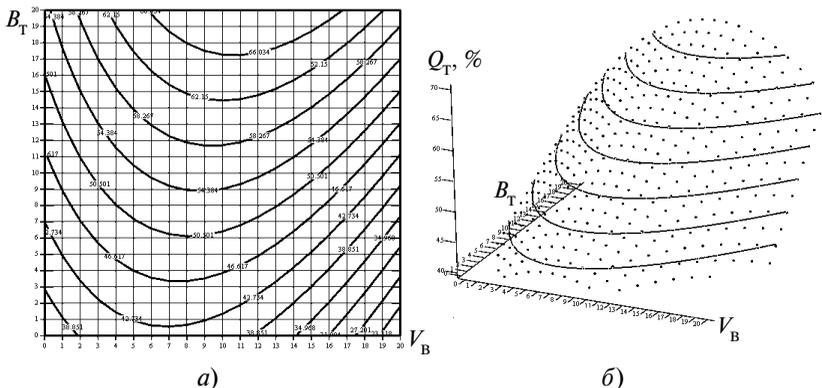


Рис. 2

Представленная на номограмме экстремальная зависимость используется экстремальным регулятором для поиска такого расхода воздуха, при котором на заданной паропроизводительности котел потребляет минимальное количество топлива.

### **Литература**

1. **Старостин А.А., Сабанин В.Р.** Применение экстремального регулятора на паровом котле // Настоящий сборник. 2015.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

В настоящее время не существует формализованных методов поиска оптимальных настроек нелинейных экстремальных регуляторов.

Данная работа имеет своей целью поиск некоторой зависимости параметров настройки экстремального регулятора от косвенного показателя оптимальности.

Экстремальный регулятор характеризуется тремя параметрами настройки: длительностью импульса, зоной нечувствительности и скоростью интегрирования. Оценка оптимальности настроек будет проводиться по интегральному критерию качества процесса регулирования:

$$I_{\text{мод}} = \int_{t=0}^{t=t_{\text{мод}}} |B_{\text{т}}^t - B_{\text{т}}^{\text{мин}}| dt ,$$

где  $B_{\text{т}}^t$  – текущий расход топлива;  $B_{\text{т}}^{\text{мин}}$  – минимальный расход топлива для заданной нагрузки, определяемый по минимуму статической характеристики.

На рис. 1 представлены обработанные результаты эксперимента в программной среде MatLab. Была получена зависимость интегрального показателя от зоны нечувствительности при разных значениях скорости интегрирования и длительности импульса. Для удобства анализа полученных результатов была проведена аппроксимация.

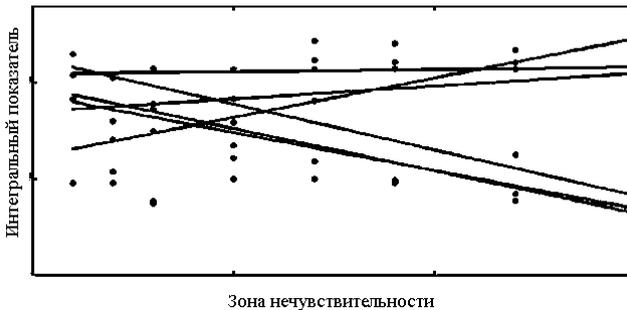


Рис. 1

## **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Важнейшим узлом газоперекачивающего агрегата является система воздушного охлаждения газа, которая обеспечивает работу компрессора и приводного двигателя в широком диапазоне изменения режимных параметров и возмущающих воздействий. Наиболее важными задачами при эксплуатации АВО газа является качественная стабилизация температуры газа на выходе. Суммарная мощность асинхронных электродвигателей, обслуживающих аппараты воздушного охлаждения, составляет несколько сот киловатт, и повышение эффективности их работы за счет внедрения высокоточных быстродействующих систем непрерывного регулирования на базе частотно-регулируемого асинхронного электропривода позволит обеспечить значительную экономию электроэнергии. Для решения задач синтеза системы автоматической стабилизации температуры необходимо иметь математическую модель, адекватно отражающую поведение объекта при наличии различных возмущений. Рассматриваемая в работе математическая модель ориентирована на разработку системы автоматической стабилизации температуры газа на выходе из теплообменника, основное назначение которой – компенсация малых отклонений температуры. Это обстоятельство позволяет рассматривать процессы охлаждения в малом, что дает возможность использовать линеаризованную модель объекта, теплофизические характеристики которого не зависят от температуры. Высокие скорости потока газа обуславливают турбулентный характер течения, а незначительная толщина стенки и высокая теплопроводность материала трубки позволяет пренебречь постоянной времени трубки и рассматривать процесс теплообмена между потоком воздуха и потоком газа, характеризуя интенсивность теплообмена некоторым приведенным коэффициентом теплопередачи от газа к воздуху. Передаточная функция объекта представлена в виде апериодического звена с транспортным запаздыванием. Для такой передаточной функции синтезирована система автоматической стабилизации температуры газа. Проведена оценка качества обработки внешних возмущений в системе с ПИ-регулятором. В качестве возмущающих воздействий рассмотрены вариации температуры воздуха и температуры газа на входе в аппарат. Из-за большой постоянной времени объекта, обусловленной тепловыми процессами, управление только по отклонению регулируемой величины не позволяет достичь требуемого качества регулирования. Для повышения быстродействия системы управления введен дополнительный контур управления по возмущению.

**Направление**  
**ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ**

Научный руководитель направления —  
директор ЭнМИ,  
к.т.н., профессор С.А. Серков



## **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, студ.; рук. И.Ю. Гаврилов, асс. (НИУ «МЭИ»)*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА АТАКИ НА ПАРАМЕТРЫ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В СОПЛОВОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ**

При проектировании паровых турбин, работающих в зоне влажного пара, необходимо учитывать наличие жидкой фазы в потоке. Как показывают исследования [1], существенное влияние оказывают крупные капли, которые двигаются со скольжением к основному потоку и не по линиям тока пара [2]. Это приводит к появлению эрозионного износа рабочих лопаток и снижению надежности. Кроме того, происходит снижение экономичности всего турбоагрегата. Для снижения концентрации и уменьшения размеров капель применяются пассивные и активные способы [3], для проектирования которых необходимо иметь достаточный объем данных о механизмах образования и движения влаги в каналах турбомашин.

Для решения данной задачи была доработана методика расчета образования жидкой пленки и движения полидисперсного потока в элементах проточных частей турбомашин в программном комплексе Fluent на кафедре паровых и газовых турбин.

В рамках настоящей работы была поставлена задача по проведению подробной верификации данной методики. В результате было получено сравнение потерь кинетической энергии, скорости и углов выхода капель.

Кроме того, течение полидисперсного потока влаги существенно осложняется на переменных режимах работы турбоагрегата. Одной из причин является изменение угла атаки, что приводит к изменению областей формирования жидкой пленки и образования жидкой фазы. С помощью полученной методики удалось установить, как меняется толщина пленки на поверхности профиля и зоны движения крупных капель. Получены зависимости размеров, скоростей и углов выхода капель в зависимости от угла атаки профиля. Кроме того, получены экономические показатели в зависимости от угла входа.

## Литература

1. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А.** Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Experimental** studies of polydispersed wet steam flows in turbine blade cascade / G. Filippov, V. Gribin, A. Tischenko et. al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. Vol. 228(2). P. 168–177.
3. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.

Ю.О. Артюшкина, студ.; рук. А.И. Лебедева, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПГУ И НА НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В ЗОНЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА**

В настоящее время парогазовые установки (ПГУ) являются наиболее экономически эффективными. В связи с этим актуальной является оценка экономических показателей и надежности деталей паровой турбины в реальных условиях эксплуатации.

Проведена оценка изменения КПД и мощности паровой турбины в составе двухконтурной утилизационной парогазовой установки с двумя газовыми турбинами ГТД-110 для различных вариантов температуры наружного воздуха и соответствующего изменения температуры выходных газов из ГТУ. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температура окружающей среды, °С	-20	15	40
КПД котла-утилизатора	0,747	0,816	0,876
Электрическая мощность паровой турбины, МВт	107,650	116,285	129,467
Абсолютный электрический КПД ПГУ	0,43	0,436	0,444
Абсолютный электрический КПД паросиловой установки	0,322	0,356	0,389
Электрическая мощность ПГУ, МВт	307,650	336,285	349,767
Абсолютный электрический КПД брутто ПГУ	0,581	0,55	0,521
Температура в зоне фазового перехода, °С	137,1	132,8	125,8

Наибольший абсолютный электрический КПД брутто рассмотренной ПГУ получен при отрицательных температурах наружного воздуха. При температуре -20 °С КПД равен 0,581.

В табл. 1 также приведены значения температуры пара в зоне фазового перехода проточной части паровой турбины. Наибольшее влияние на снижение надежности деталей проточной части паровой турбины оказывают зимние режимы, при которых температура пара в зоне фазового перехода (ЗФП) наиболее высокая. При этом повышается коррозионная активность среды в ЗФП, что может привести к появлению коррозионного растрескивания дисков и коррозионно-усталостного разрушения рабочих лопаток.

*Т.В. Ахматова, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ТИХОХОДНЫХ ТУРБИН МОЩНОСТЬЮ 1000–1500 МВт И БОЛЕЕ ДЛЯ АЭС**

Одной из основных особенностей атомных электростанций являются низкие параметры пара, что приводит к малому теплоперепаду и чрезвычайно большим расходам пара для увеличения мощности с целью снижения стоимости АЭС.

Стоимость паротурбинной установки определяется в первую очередь, стоимостью паровой турбины, а стоимость последней – числом цилиндров (особенно ЦНД) [1]. Поэтому при проектировании паровую турбину стремятся сделать экономичной, надежной и компактной.

Увеличение расхода пара через последнюю ступень позволяет уменьшить число цилиндров низкого давления и число подшипников; сократить длину и уменьшить массу турбоагрегата. В целом реализация этих возможностей ведет к снижению стоимости станции за счет упрощения тепловой схемы и сокращения размеров машинного цеха и, в частности, фундамента турбоагрегата. При этом повышается эксплуатационная надежность турбины, сокращаются сроки монтажа и ремонта турбоагрегата. Увеличение объемного пропуска пара через последнюю ступень конденсационных турбин представляет одну из главных проблем развития паровых турбин.

При грамотном конструировании последней ступени увеличенной пропускной способности появляется возможность повышения экономичности ступени и всей части низкого давления турбины.

Увеличение выходной площади за счет использования последних ступеней с рабочими лопатками предельной длины является необходимым условием, определяющим конкурентоспособность оборудования.

Одним из возможных путей увеличения кольцевой площади выхода пара и, следовательно, уменьшения числа выходных потоков является переход на половинную частоту вращения [1, 2].

В связи с этим рассматривается принципиальная возможность создания перспективной тихоходной паровой турбины К-1200-6,8/25 мощностью 1200 МВт на 1500 об/мин с ЦНД повышенной пропускной способностью и длиной рабочей лопатки последней ступени 1760 мм, работающего в условиях глубокого вакуума, и с длиной 1460 мм, работающего в условиях ухудшенного вакуума.

### **Литература**

1. **Паровые** и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин и др.; под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. – 5-е изд., доп. и подгот. к печати проф. Б.М. Трояновским. М.: Энергия, 1976.

## **ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ АЭС С ВВЭР ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 910 т/ч**

На двухконтурных отечественных АЭС, работающих с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), важнейшим элементом блока является горизонтальный парогенератор (ПГ). От его надежной работы зависит бесперебойное обеспечение турбины электростанции необходимым количеством пара заданных параметров.

Разработка модернизированной конструкции парогенератора призвана повысить надежность отдельных узлов, а также ПГ в целом. Только добившись высокой степени безотказной работы энергетического оборудования на протяжении установленного ресурса, можно увеличивать единичную мощность установок. Это будет уместно делать, применяя уже хорошо зарекомендовавшие себя узлы и конструкции.

На примере этого проекта можно выявить слабые стороны устройства. Зная их, легче будет проводить необходимый ремонт, а также выбирать направления для модернизации существующего оборудования и создания нового. Перечислим эти недостатки:

- большое количество вальцовочных соединений теплообменных труб с коллектором. В случае возникновения течи трубу полностью заглушают. Для таких целей число теплообменных труб выбирается с запасом 2 %;

- ненадежный сварной шов в нижней части коллектора теплоносителя. Из-за работы в неблагоприятных условиях и наличия значительных температурных напряжений возможно растрескивание. Для улучшения ситуации используется продувка карманов коллектора с целью предотвращения негативного воздействия скапливающегося шлама;

- неэффективная работа погруженного дырчатого листа. Не удается создать паровую подушку для распределения пара на всю плоскость зеркала испарения. Возможно дифференцированное перфорирование листа. При этом около горячего коллектора предполагается использование отверстий меньшего диаметра для создания большего сопротивления.

Предложенные мероприятия улучшают работу ПГ и позволяют проектировать установки большей мощности и надежности.

Выполнены расчет теплового баланса, тепловой, компоновочный, прочностной и экономический расчеты. Определена оптимальная скорость теплоносителя, при которой достигается минимум суммарных (капитальных плюс эксплуатационных затрат).

Длина парогенератора 15,254 м, наружный диаметр 3,54 м, масса 156 т, поэтому возможна его перевозка по железной дороге.



*А.В. Гурьянова, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **УТИЛИЗАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ**

Внедрение и развитие энергосберегающих технологий приобретает особенную актуальность ввиду постоянного роста потребления топливно-энергетических ресурсов и их стоимости. Решение задач, связанных с повышением энергетической эффективности в различных отраслях промышленности, возможно за счет применения различных утилизационных технологий сбросного тепла, которое обычно сбрасывается и безвозвратно теряется в атмосфере.

Утилизация тепла уходящих газов позволяет повысить эффективность производства, на котором используются газотурбинные двигатели для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Обычно для утилизации теплоты уходящих газов используются теплообменники, обеспечивающие тепловой энергией компрессорную станцию, а в некоторых случаях и расположенные вблизи небольшие поселки.

Температура газов, покидающих ГТД, составляет 400–600 °С, что позволяет организовать генерацию рабочего тела для паротурбинной установки и осуществить выработку электрической энергии без сжигания дополнительного топлива [1, 2].

Организовать выработку электроэнергии можно с использованием традиционной для парогазовых установок технологии. Проведенные расчеты различных вариантов тепловых схем утилизационного комплекса на базе ГПА-Ц1-16С/76-1,35М с традиционным одноконтурным котлом-утилизатором, выполненным по схеме 2×ГПА+2×КУ+1×ПТ, показали, что использование бросовой энергии уходящих газов с температурой 426 °С позволяет выработать 12 МВт электроэнергии в паросиловом цикле. Таким образом, надстройка газотурбинных агрегатов паросиловыми блоками с традиционными котлами-утилизаторами позволяет повысить коэффициент использования теплоты сжигаемого топлива до 45–46 %.

Рассмотрение технологии утилизации тепла, предложенной специалистами ЗАО «Турбокон» с использованием газоводяного нагревателя с одно- и двухступенчатым сепарированием показало целесообразность предложенного решения. При использовании указанной технологии электрическая мощность паровой турбины составила 13,1 и 13,6 МВт, а коэффициент использования топлива увеличился на 1,2–1,7 %.

### **Литература**

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Паровые** и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин и др.; под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

А.А. Гусев, асп.; Н.А. Ларин, Е.А. Тюшкина, студенты;  
рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕЙСТЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В настоящее время при ремонте и модернизации паровых турбин широкое применение находят статорные части уплотнений, представляющие собой конструкции с сотовыми вставками. Однако сотовые конструкции технологически чрезвычайно сложны в изготовлении, и поэтому дороги.

Кафедра паровых и газовых турбин совместно с Опытным заводом МЭИ разработала более простую и надежную, а главное, существенно более дешевую технологию изготовления ячейстых конструкций статорных частей уплотнений. Конфигурация прямоугольно-ячейстых уплотнений аналогична конфигурации сотовых, только ячейки (соты) – прямоугольные или квадратные с диаметром вписанной окружности  $d_{я}$ .

В работе исследовались силовые характеристики двух- и трехгребенчатых уплотнений с гладкими, сотовыми и квадратно-ячейстыми статорными частями. Зависимости жесткости неконсервативной возмущающей силы, способной вызывать низкочастотную вибрацию, от относительного радиального зазора для исследованных типов уплотнений показаны на рис. 1. Здесь  $D_H$  – жесткость измеренной силы, а индексы 3г, 3с и 3я соответствуют трехгребенчатым уплотнениям с гладким статором, сотовым и ячейстым. Индексы 2г, 2с и 2я соответствуют двухгребенчатым уплотнениям.

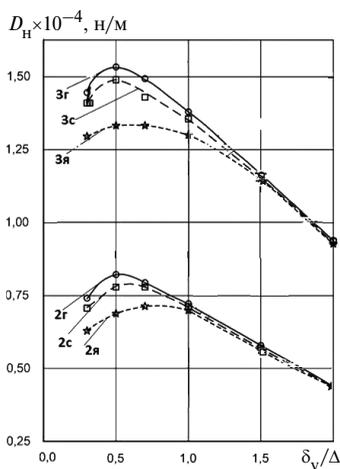


Рис. 1. Результаты измерения  
аэродинамических сил

статорными вставками, а также с сотовыми вставками, квадратно-ячейстые уплотнения при аналогичных радиальных зазорах оказываются такими же или несколько лучшими традиционных и сотовых уплотнений, но неконсервативные возмущающие силы у них, как это видно из рис. 1, существенно ниже, чем у традиционных и сотовых, причем это снижение наиболее существенно в области малых радиальных зазоров.

Д.В. Дмитриев, студ.; рук. В.Ф. Касилов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ПГУ-300 ЮГО-ЗАПАДНОЙ ТЭЦ

В настоящее время на Юго-Западной ТЭЦ (г. Санкт-Петербург) успешно эксплуатируется ПГУ-200 и начинается строительство энергоблока ПГУ-300 ( $N_3 = 300$  МВт,  $Q_T = 215$  Гкал/час), тепловая схема которого (рис. 1) сформирована по трипл-блочному принципу ( $3 \times \text{ГТУ} + 3 \times \text{КУ} + 1 \times \text{ПТУ}$ ). Генерирующее оборудование представлено ГТУ SGT-1000F *Ansaldo Energia* ( $N_3 = 66$  МВт), паровой турбиной *Siemens* ( $N_3 = 106$  МВт) и котлами-утилизаторами (КУ) ОАО «Подольский машиностроительный завод». В тепловой схеме ПГУ-300 реализуются следующие параметры пара: в первом контуре ( $G_0^I = 319$  т/ч) давление  $p_0^I = 9,1$  МПа, температура  $t_0^I = 510$  °С; во втором контуре ( $G_0^{II} = 39,3$  т/ч),  $p_0^{II} = 0,65$  МПа,  $t_0^{II} = 260$  °С.

Для представленной схемы (рис. 1) выполнено сравнение основных показателей электрической мощности (брутто) и экономичности энергоблока для двух вариантов исполнения паротурбинного агрегата. Первый из них спроектирован на основе технических характеристик, принятых в ОАО «ЛМЗ», а второй – АО *Siemens*. В качестве прототипов соответственно приняты паровые турбины Т-105-9,1 и SST-600. В табл. 1 приведены результаты расчетов тепловой схемы с данными турбинами (при  $t_B = -1,8$  °С), показывающие в пределах погрешностей принятых методик близкие результаты.

Таблица 1

Паровая турбина	Мощность ПГУ, МВт	Мощность ГТУ, МВт	Мощность ПТУ, МВт	Тепловая мощность, МВт	КПД брутто, %
ОАО «ЛМЗ»	328,2	239,3	88,9	113,3	59,4
Siemens	328,7	239,3	89,4	113,3	59,5

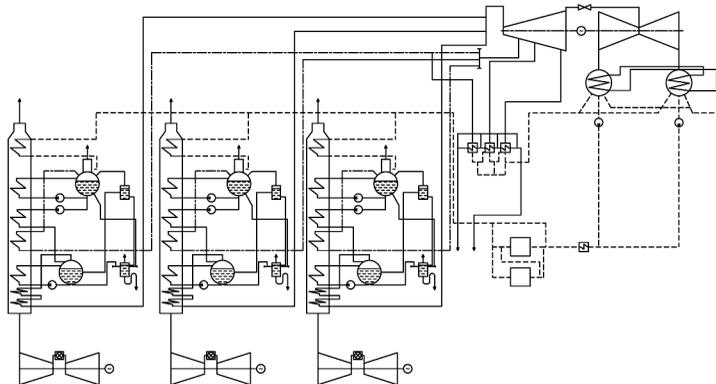


Рис. 1. Тепловая схема парогазовой установки ПГУ-300 Юго-Западной ТЭЦ

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ПОТЕРЬ**

В настоящее время опыт эксплуатации паровых турбин, а также проведение экспериментально-расчетных работ в области аэродинамики профилей лопаток проточных частей позволили накопить и обобщить данные о влиянии геометрических характеристик профилей на экономичность работы турбины. Разработанные полуэмпирические модели, учитывающие различные факторы, воздействующие на КПД как сопловых, так и рабочих лопаток, позволили существенно сократить время, затраченное на их проектирование с точки зрения аэродинамической эффективности. При этом развитие современных численных методов моделирования потока в проточных частях турбин позволяет существенно расширить возможности этих подходов. Это связано с тем, что верифицированный CFD код, математические модели которого учитывают основные процессы, протекающие в потоке, является альтернативой сложным и дорогостоящим экспериментальным работам. Стоит отметить важность валидации численных методов в широком диапазоне режимных и геометрических параметров.

В данной работе предложен подход, основанный на [1], для определения оптимальных геометрических параметров лопатки турбины с точки зрения минимума профильных потерь. Исходные данные для получения основных зависимостей брались из [2], где представлено большое количество информации по лопаткам с различной геометрией. В результате был создан метод, который предлагает оптимальные характеристики профиля, основываясь на базовых геометрических данных и режимных параметрах работы ступени. Полученные данные применяются для построения лопатки с использованием кривых Безье [3].

Построенные таким образом профили обрабатываются в CFD коде для получения подробной информации о характере течения потока в межлопаточном канале.

### **Литература**

1. **Cadreja David, Vázquez Raúl.** Profile Loss Model For Low-Pressure Turbines // 9<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference: тезисы доклада международной конференции. Стамбул, 2011.
2. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я.** Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машиностроение, 1965.
3. **Blade Parameterization and Aerodynamic Design Optimization for a 3D Transonic Compressor Rotor / Naixing Chen, Hongwu Zhang, Yanji Xu, Weiguang Huang // Journal of Thermal Science. Vol. 16. 2007. No 2.**

А.П. Карпунин, асп.; рук. А.Г. Костюк, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## АНАЛИЗ РОСТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ОХЛАЖДАЕМЫХ СТУПЕНЯХ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

В охлаждаемых газовых турбинах, работающих в составе высокотемпературных газотурбинных установок, по сравнению с неохлаждаемыми существует ряд дополнительных потерь, а именно: потери на прокачку охлаждающего воздуха, потери на конвективное охлаждение, потери на перфорационное охлаждение, а также дополнительные аэродинамические потери в охлаждаемой решетке. Последний вид потерь обусловлен необходимостью отступать от обычных газодинамически совершенных профилей, чтобы расположить внутри лопаток каналы для подвода охлаждающего воздуха. При этом кромки лопаток выполняются более толстыми, увеличивается относительная толщина профиля лопатки, что способствует росту суммарных аэродинамических потерь.

В данной работе выполнен анализ роста аэродинамических потерь в ступенях охлаждаемой газовой турбины. Расчеты проведены в соответствии с методикой [1], для определения полных аэродинамических потерь в решетке использована формула

$$\zeta_{\text{пр}} = \left[ \left( \zeta_{\text{пр}}^{\text{м}} - \zeta_{\text{кр}}^{\text{м}} \right) \frac{1 + \bar{T}B/l}{1 + (\bar{T}B/l)^{\text{м}}} + \Delta\zeta_{\text{тр.п}} (1 + \bar{T}B/l) \right] \left( \frac{\bar{T}_{\text{г}}}{T_{\text{в}}} \right)^p + \zeta_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где  $\zeta_{\text{пр}}$  и  $\zeta_{\text{кр}}$  – соответственно профильные и кромочные потери в решетке;  $\Delta\zeta_{\text{тр.п}}$  – дополнительные потери от вдува на профильных поверхностях канала;  $\bar{T}$ ,  $B$ ,  $l$  – относительный шаг решетки, ширина решетки и высота лопаток;  $\bar{T}_{\text{г}}$  и  $T_{\text{в}}$  – температура газа и температура металла лопаток; показатель степени  $p = 0,3$ . Индекс «м» относится к параметрам модельной решетки.

Для реализации указанной методики составлена компьютерная программа расчета охлаждаемой газовой турбины, с использованием которой выполнены расчеты потерь в охлаждаемых ступенях при некоторых заданных начальных параметрах. Исследованы зависимости аэродинамических потерь от величины расхода охлаждающего воздуха, некоторых параметров решетки и потока газа.

Полученные результаты могут быть интересны при проектировании и расчете охлаждаемых ступеней газовых турбин.

### Литература

1. Костюк А.Г., Дмитриев С.С. Тепловой расчет охлаждаемой турбинной ступени. М.: Рукопись, 2013.

*М.Б. Комолов, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИРЯДНОГО НАСОСА ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПОГРУЖНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

В Российской Федерации в связи с интенсификацией добычи [1] нефтяные компании стремятся использовать все более энергоэффективные погружные насосные установки (ПНУ). Серийно выпускаемые энергоэффективные многоступенчатые насосы для ПНУ рассматриваемого и близких типоразмеров созданы на основе центробежных рабочих органов [2] и к настоящему времени вышли на практически предельные для них уровни напорно-энергетических показателей. Дальнейший существенный прогресс требует принципиально новых решений. Одно из них – инновационный энергоэффективный полирядный осевой насос [3].

Целью исследования являлось практическое подтверждение возможности достижения повышенных показателей назначения и энергетического качества полирядных насосов по сравнению с традиционными. В рамках исследования, с помощью ANSYS CFX разработана ступень одного из трех рядов насоса, на специальном стенде проведена серия ее гидромеханических испытаний, по результатам которых получены напорно-энергетические характеристики ступеней каждого ряда и насоса в целом. Результатами исследования свойств полирядного насоса явились интегральные показатели качества, превосходящие уровень серийно выпускаемых энергоэффективных насосов для ПНУ, что достигается за счет пониженных механических потерь путем разгрузки ротора от осевой силы подбором числа ступеней в разнонаправленных рядах насоса.

Полученные результаты будут использованы для дальнейших исследований, в частности для реализации физического эксперимента насоса в целом, по результатам которого будет составлено окончательное суждение о функциональных возможностях полирядного насоса.

### **Литература**

1. **Ивановский В.Н.** Анализ современного состояния и перспектив развития скважинных насосных установок для добычи нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2007. № 6.
2. **Агеев Ш.Р., Григорян Е.Е., Макиенко Г.П.** Российские установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение: энциклопедический справочник. Пермь: ООО «Пресс-Мастер», 2007.
3. **Моргунов Г.М., Моргунов К.Г., Эльзароок Фарадж.** Проектирование и расчетные исследования гидродинамических свойств полирядного высоконапорного насоса на малые подачи // Вестник МЭИ. 2007. № 6.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОЙ РАСТОПОЧНОЙ ГОРЕЛКИ НА ВЫПОЛНЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В НЕЙ

Альтернативой существующим способам растопки пылеугольных котлов с факельным сжиганием является применение растопочных горелок, работающих на специально приготовленной пыли с повышенной реакционной способностью. Они могут иметь различную конструкцию, и одним из возможных вариантов является двухканальная вихревая горелка с цилиндрическим (центральный) и кольцевым каналом.

Основным принципом стабилизации горения, который заложен в такую конструкцию, является подвод горячих продуктов сгорания к корню факела в замкнутой зоне возвратных течений (ЗОТ). Эта зона образуется за счет закрутки воздуха в аксиальном закручивающем устройстве. В работе [1] это названо необходимыми условиями функционирования такой горелки.

Функционирование данной горелки возможно лишь при определенных соотношениях внешнего диаметра канала  $d$ , внутреннего диаметра канала  $D$  и угла установки лопаток закручивающего аппарата  $\beta_L$ . При слишком малых значениях параметра закрутки  $n$  ЗОТ не образуется, а при слишком больших  $n$  происходит затягивание ЗОТ в канал, что приведет к окалинообразованию стенок горелки. При снижении соотношения  $m = D/d$  часть ЗОТ также затягивается в канал. При стремлении  $m$  к 1 уменьшается расход среды через периферийный канал, так как в нем необходимо поддерживать определенную скорость. Это возможно только в определенных пределах, индивидуальных для каждого конкретного случая.

Следует отметить, что при различном соотношении указанных выше параметров может изменяться тип зоны обратных токов. Она может быть замкнутая, полузамкнутая, разомкнутая или кольцевая. Для выполнения необходимых условий функционирования горелки ЗОТ должна быть замкнутая или полузамкнутая. В противном случае к корню факела будет подводиться топочная среда, которая имеет низкую температуру при пуске.

Целью данного исследования является углубление данных численных исследований влияния  $d$ ,  $D$ , а так же  $\beta_L$  на аэродинамическую структуру течения кольцевой струи при отсутствии ввода среды через центральный канал и уточнение диапазона этих параметров, в котором выполняются необходимые условия функционирования горелки.

### Литература

1. Хохлов Д.А. Разработка и исследование вихревой растопочной горелки для сжигания пыли повышенной реакционной способности: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2013.

Н.А. Ларин, Е.А. Тюшкина, студенты; А.А. Гусев, асп.;  
рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ДИФFUЗОРНОМ КАНАЛЕ С ПОВОРОТОМ ПОТОКА НА 90°

На рис. 1 показан вид и размеры исследованного плоского диффузорного канала с поворотом потока на 90°. В выходном сечении канала у нижней отклоняющейся стенки на всех исследованных режимах фиксировалась застойная область, занимавшая порядка 40 % выходного сечения.

С целью ликвидации этой застойной зоны и выравнивания поля скоростей внутри канала устанавливались перфорированные пластины, показанные на рис. 2. Были проведены исследования по поиску оптимального места установки пластин в канале и выявлено оптимальное расположение пластины внутри канала (см. рис. 1).

В точках 1–9 на боковых стенках канала в выходном сечении, как это показано на рис. 1, измерялись пульсации давления.

На рис. 3 показано, как по высоте канала изменяется среднеквадратичное значение амплитуд пульсаций давления, отнесенное к перепаду давления на канал, который в этой серии экспериментов поддерживался постоянным.

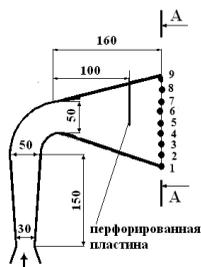


Рис. 1. Вид исследованного канала

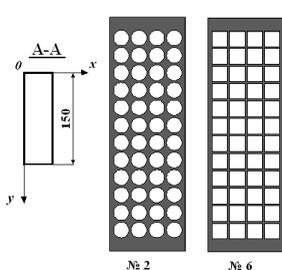


Рис. 2. Вид перфорированных сеток

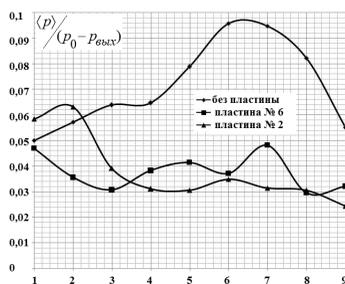


Рис. 3. Относительная интенсивность пульсаций давления в выходном сечении

Видно, что установка пластин существенно уменьшает динамическое воздействие на стенки канала.

В исходном канале без пластин в районе точек 5–8 фиксируется максимум пульсаций давления, который составляет порядка 10 % от перепада давлений, а при установке пластин интенсивность пульсационного движения существенно уменьшается по всей высоте выходного сечения и составляет от 3 до 5 % от перепада давлений на канал.

*Р.С. Маслов, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР СО СПИРАЛЬНОЙ НАВИВКОЙ ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 913 т/ч ДЛЯ АЭС С ВВЭР**

Ядерная энергетика по-прежнему является актуальной в связи с низкой себестоимостью отпускаемой электроэнергии и значительными топливными запасами бедных урановых руд.

На отечественных атомных электростанциях используются горизонтальные парогенераторы (ПГ), конструкция которых хорошо отработана технологически нашей промышленностью.

В данной работе сделана попытка создания конструкции парогенератора АЭС вертикального типа со спиральной навивкой. Преимуществами таких ПГ являются лучшая по сравнению с горизонтальными ПГ компоновка с реактором и надежность естественной циркуляции. Кроме того, спиральная поверхность нагрева позволяет компенсировать температурные напряжения и имеет равную длину труб пучка. Последнее обстоятельство позволяет обеспечить одинаковые расходы теплоносителя в трубах.

По ходу разработки конструкции автором выполнены расчет теплового баланса, тепловой, компоновочный, прочностной и экономический расчеты. По сути, определена оптимальная скорость теплоносителя, при которой достигается минимум суммарных (капитальных плюс эксплуатационных затрат).

В процессе проектирования были приняты следующие основные конструктивные решения:

- размещение коллектора раздачи питательной воды в нижней части парогенератора;
- использование двухступенчатой схемы сепарации пара;
- применение выемной втулки;
- соосное расположение патрубков входа и выхода теплоносителя.

Характеристики разработанного парогенератора АЭС:

- паропроизводительность – 913 т/ч;
- тепловая мощность ПГ – 452 МВт;
- скорость теплоносителя в трубах – 4,3 м/с;
- площадь поверхности теплообмена – 4335 м<sup>2</sup>;
- внешний диаметр парогенератора – 4184 мм;
- габаритная высота ПГ – 18343 мм;
- масса парогенератора – 203 т.

Габаритные размеры и масса ПГ показывают, что его можно перевозить при помощи железнодорожного транспорта.

*И.С. Низамов, студ.; рук. Б.М. Осипов, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)*

## **ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ НОВОГО ТИПА**

ГТУ с котлом-утилизатором нового типа (с гетерогенными фотоэлементами) – одно из эффективных использований газотурбинных двигателей в настоящее время. Гетероэлектрический фотоэлемент (другое его название ГЭФ) в совокупности с гетероэлектрическим конденсатором способен работать в видимом и инфракрасном излучениях, т.е. в отличие от солнечных батарей с 20 % эффективностью облачность и ночное время работе для гетероэлектрического фотоэлемента не помеха. Эффективность работы нового устройства при видимом свете порядка 54 %, а в инфракрасном спектре – 31 %, при фототоке в 4 раза выше и массой на ватт энергии в 1000 раз меньше, чем у фотоэлементов, существующих солнечных батарей [1]. Расчеты показывают, что стоимость «звездной батареи» будет намного ниже, чем у всех существующих современных устройств [2].

Гетерогенные фотоэлементы способны работать в широком диапазоне излучения, включая диапазон инфракрасного спектра [3]. Элемент даже способен улавливать излучение звезд. КПД этих элементов в инфракрасном спектре достигает порядка 35–37 %. В перспективе в видимом диапазоне их КПД может достигать 90 % [4].

Недостатком данной разработки является то, что она еще не нашла практического применения в энергетике.

Решаемой задачей заявляемого изобретения является снижение расхода топлива и увеличение КПД при производстве электроэнергии.

Целью данной работы является исследование нового и более экономичного использования гетерогенных структур в сочетании с газотурбинным двигателем для повышения эффективности работы ГТУ с котлом-утилизатором нового типа, где используются гетерогенные фотоэлементы.

### **Литература**

1. Гетероэлектрики – прорывное достижение российских ученых. URL: <http://www.cntiproggress.ru/eventnews/5782.aspx>
2. «Звездная батарея» – псевдонаучная сенсация или русская технологическая революция? URL: <http://www.warandpeace.ru/ru/exclusive/view/4634/>
3. **Тумерман Л.А.** Фотоэлемент и его применения. Серия Наука – массам. М.: ОНТИ, 1934.
4. **Зигель Р., Хауэлл Дж., Хрусталеv Б.А.** Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.

*М.А. Носкова, студ.; рук. Е.А. Зарянкин, проф., д.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ ПГУ**

Для парогазовых установок (ПГУ) важными экономическими показателями являются металлоемкость и удельные капитальные затраты. Оба этих показателя снижаются с ростом мощности газовой турбины. Поскольку показатели ПГУ в значительной степени определяются уровнем начальной температуры газов перед газовой турбиной, то в области газотурбостроения отчетливо просматривается тенденция к дальнейшему повышению температуры газов перед газовой турбиной [1].

Существенно снизить металлоемкость ПГУ и капитальные затраты при их строительстве можно путем применения на ТЭС парогазовых установок с дополнительным энергетическим котлом [2].

Тепловая схема такой ПГУ состоит из газотурбинной установки (ГТУ) Siemens SGT5-4000F, паровой турбины, прототипом которой является К-215-130-3 ЛМЗ, трех подогревателей высокого давления, четырех подогревателей низкого давления, двух деаэраторов, двухконтурного котла-утилизатора, энергетического котла и конденсатора. Благодаря дополнительному энергетическому котлу мощность паровой турбины увеличивается до мощности, равной мощности компрессора. Что позволит примерно в два раза увеличить полную мощность газовой турбины и на 25–30 % увеличить установленную мощность ПГУ на базе одной ГТУ [3]. Отметим также, что в представленной схеме паровая турбина используется как в регенеративном цикле Ренкина на базе дополнительного котла, так и в качестве утилизационной турбины обычной ПГУ. КПД регенеративного цикла по сравнению с безрегенеративным циклом на 7–10 % оказывается выше. В данном случае КПД паротурбинной установки с регенерацией составляет 45,1 %, а без регенерации – 33,42 %. Расчет такой тепловой схемы показал, что мощность ПГУ с дополнительным энергетическим котлом составит 510 МВт КПД – 56 %.

### **Литература**

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Wancai Lui, Hui Zang.** Steam turbine driving compressor for gas – steam combined cycle power plant // Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE. 2009, November 13–19, Lake Buena Vista, Florida, the USA.
3. **Зарянкин А.Е. Магер А.С., Роголёв А.Н.** Сверхмощные ПГУ на базе одной газовой турбины // Газотурбинные технологии. 2014. № 7 (58).

С.К. Осипов, студ.; рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ЦНД С МАКСИМАЛЬНЫМ ПРОПУСКОМ ПАРА В КОНДЕНСАТОР

Проблема увеличения единичной мощности паротурбинных блоков – это проблема создания цилиндров низкого давления с максимально возможным пропуском пара в конденсатор. Рассматриваются следующие варианты ЦНД:

- ЦНД с длиной лопаток последней ступени  $l_z = 1400$  мм;
- ЦНД со ступенью Баумана и длинной лопатки  $l_z = 1200$  мм;
- ЦНД с разворотом потока после предпоследней ступени на  $180^\circ$ ;
- двухъярусный ЦНД с длиной лопатки последней ступени  $l_z = 1200$  мм на базе модернизированных ступеней Шелленса [1].

На основе проведенного анализа показано, что с аэродинамической точки зрения наиболее перспективным вариантом является вариант двухъярусного ЦНД, продольный разрез которого показан на рис. 1.

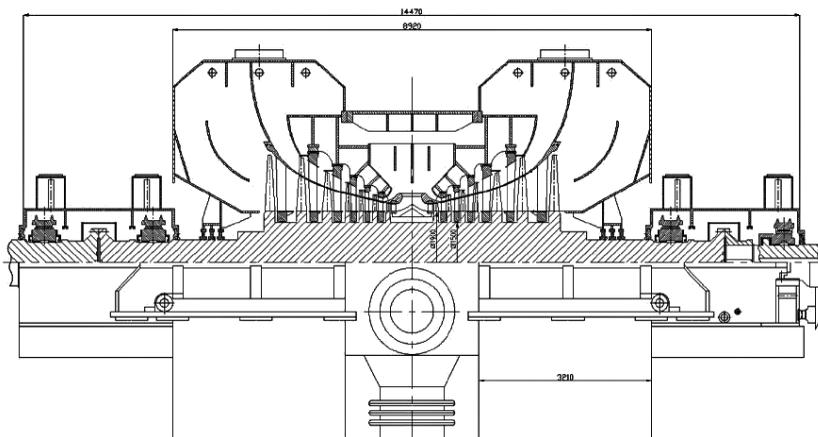


Рис. 1. Продольный разрез двухъярусного ЦНД

### Литература

1. Зарянкин А.Е., Арианов С.В., Зарянкин В.А. Двухъярусный цилиндр низкого давления конденсационной паровой турбины: Патент № 2372491.

*Г.В. Палагин, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ**

В России и странах Евросоюза выпускаются котлы двух и трех ходового исполнения. Мощность данного оборудования находится в пределах от 50 кВт до 10 МВт и ограничивается только габаритами котлов при транспортировке. Показатели КПД аэродинамического и гидравлического сопротивления примерно равны и отличаются в незначительных пределах. Повышение КПД связано с установкой дополнительных поверхностей нагрева по ходу газов с использованием скрытой теплоты парообразования. Самое большое различие среди указанных типов котлов – по показателю удельной мощности к весу. В работе будут рассмотрены мероприятия по интенсификации теплопередачи и конструктивные изменения, которые должны привести к снижению металлоемкости котлов.

В результате исследования будут разработаны основы методов численного расчета процесса горения и передачи теплоты в жаротрубном котле с учетом многофакторного влияния различных характеристик. Будут предложены и опробованы методы экспериментального исследования опытных образцов жаротрубных котлов новой модификации, получены оптимальные параметры, обеспечивающие стабильную и безопасную работу жаротрубных котлов с высокой энергетической эффективностью.

Уменьшение металлоемкости котла будет достигнуто за счет увеличения плотности теплового потока в топке и увеличения доли конвективного теплообмена. На первом этапе проекта необходимо провести исследование существующих методик расчета на адекватных моделях котлов. Это можно осуществить с использованием программы Boiler Designer [1, 2].

### **Литература**

1. **Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Расчет циркуляции котла-утилизатора Пр-76-3.3-415 // Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования: Труды Международной научно-практической конференции «Boiler Designer-2014». М.: Торусс пресс, 2014.

2. **Супранов В.М., Изюмов М.А.** Использование программы «Boiler Designer» в учебном процессе на кафедре парогенераторостроения «МЭИ» // Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования: Труды Международной научно-практической конференции «Boiler Designer-2014». М.: Торусс пресс, 2014.

М.А. Плахова, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## **ПГУ-ТЭЦ НА БАЗЕ ДВУХ ГТУ LM 6000 PD SPRINT**

Одной из важных проблем, стоящей перед отечественной энергетикой, является эффективное и безопасное снабжение потребителей тепловой и электрической энергией. Задача теплофикации всегда была актуальной в энергетической отрасли, что обусловлено особенностями климатических условий, в которых находится большая часть нашей страны.

Обеспечение энергетической эффективности комбинированной выработки тепловой и электрической энергии возможно за счет использования парогазовых технологий. Необходимо отметить и улучшение экологических характеристик таких блоков, поскольку снижение выбросов оксидов азота и серы достигает 50 % по сравнению с традиционной ТЭЦ [1, 2].

Комбинированное производство тепловой и электрической энергии в парогазовом цикле можно осуществить, поместив поверхности газового подогревателя сетевой воды в выходной части котла-утилизатора.

Некоторые результаты расчета принципиальной тепловой схемы ПГУ-ТЭЦ на базе двух газотурбинных установок (ГТУ) фирмы «General Electric» LM 6000 PD Sprint, выполненной по схеме  $2 \times \text{ГТУ} + 2 \times \text{КУ} + 1 \times \text{ПТ}$ , с одноконтурным котлом-утилизатором, предназначенным для выработки пара и горячей воды, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Технико-экономические показатели ПГУ-ТЭЦ**

Наименование величины	Схема без дожигаия	Схема с дожигом
Мощность ПГУ, МВт	115,5	114,3
Электрическая мощность ПТУ, МВт	25,51	24,33
Тепловая мощность ГПСВ, МВт	26,02	18,61
Тепловая мощность сетевого подогревателя, МВт	–	44,18
Коэффициент использования топлива ПГУ	0,645	0,748
Степень бинарности цикла	1	0,839

Повышение тепловой мощности ПГУ-ТЭЦ возможно за счет использования КУ с дожигом и выполнения паровой турбины с теплофикационным отбором при неизменных характеристиках ГТУ. Это наиболее акту-

ально при создании ПГУ на базе ГТУ с относительно невысокой температурой уходящих газов 400–500 °С, не позволяющих использовать многоконтурные котлы-утилизаторы.

### Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Паровые** и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин и др.; под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

*В.В. Попов, асп.; рук-ли В.Г. Грибин, д.т.н., проф.;*  
*В.А. Тищенко, асс. (НИУ «МЭИ»)*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ В СОПЛОВОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ**

При проектировании паровых турбин существенное внимание уделяется применению различных методов борьбы с отрицательным воздействием влаги на работу турбины. Одним из наиболее эффективных является метод внутриканальной сепарации с отсосом жидкой пленки с поверхности сопловых турбинных лопаток [1]. Этот способ весьма эффективен с точки зрения уменьшения количества крупных капель в потоке и, как следствие, уменьшения эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток [2]. Однако применение метода внутриканальной сепарации требует наличия достоверных данных о структуре и характере течения пленки на поверхностях межлопаточных каналов турбины, а также о физических аспектах самого процесса сепарации.

В рамках настоящей работы была поставлена задача по проведению экспериментального исследования влияния внутриканальной сепарации в плоском пакете сопловых лопаток на структуру и характеристики влажно-парового потока за решеткой. Эксперименты проводились на пародинамическом стенде КВП кафедры паровых и газовых турбин. В ходе эксперимента использовались инновационные методики оптического исследования потоков влажного пара, которые позволили определить поля скоростей и дисперсность жидкой фазы за сопловой решеткой. Изучено влияние положения щелей на лопатке (две щели на вогнутой стороне лопатки) и перепада давления на щель. Раздельно определены расходы жидкой и паровой фаз через щель.

Кроме того, выполнена задача по численному моделированию процессов формирования и течения жидкой пленки на поверхностях сопловых турбинных лопаток, а также ее сепарации через щель на лопатке. Численное исследование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent. Применение данной методики в перспективе позволит ускорить работу по созданию профилей сопловых лопаток и выбору оптимального расположения на них сепарационных щелей.

### **Литература**

1. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.
2. **Грибин В.Г., Коршунов Б.А., Тищенко А.А.** Исследование внутриканальной сепарации влаги в турбинных сопловых решетках // Теплоэнергетика. 2010. № 9.

*Т.Д. Рогова, студ.; рук. А.И. Лебедева, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ В ЦВД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В СОСТАВЕ ДВУХКОНТУРНОЙ ПГУ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ЦВД**

Сотовые уплотнения – это усовершенствованный тип уплотнений с использованием сотовой поверхности. Конструктивно соты имеют форму шестигранных ячеек с диаметром вписанной окружности, равной 1,5 мм. Сотоблоки изготавливаются из жаростойкой хромоникелевой фольги толщиной 0,05 мм и припаиваются к вставкам, из которых собирается кольцо сотового уплотнения для последующего монтажа в проточную часть турбины [1].

При установке сотовых уплотнений радиальный зазор в надбандажных и диафрагменных уплотнениях может быть уменьшен с 1,5 до 0,5 мм.

Автором проведена оценка влияния этого фактора на повышение относительного внутреннего КПД и мощности ЦВД паровой турбины в составе двухконтурной ПГУ на базе ГТУ PG9351(FA) фирмы «Дженерал Электрик». Получено, что при использовании сотовых уплотнений вместо осе-радиальных в ЦВД паровой турбины мощностью 127 МВт, приращение КПД  $\eta_{oi}$  для ЦВД составит 2,6 %, а приращение внутренней мощности ЦВД  $\Delta N_{i \text{ ЦВД}} - 1,55$  МВт.

Применение сотовых уплотнений позволяет повысить относительный внутренний КПД и мощность ЦВД за счет снижения утечек пара в уплотнениях, при этом отмечается увеличение срока службы сотовых уплотнений по сравнению с традиционными уплотнениями в 2÷3 раза [2].

Вместе с тем было получено, что применение сотовых уплотнений в ЦВД паровой турбины двухконтурной ПГУ приводит к повышению температуры в зоне фазового перехода с 125 °С до 133 °С. При повышении температуры в зоне фазового перехода коррозионные процессы будут идти более интенсивно, что негативно скажется на надежности деталей проточной части паровой турбины.

### **Литература**

1. **Сахаров А.М., Коновалов В.К., Ушинин С.В.** Результаты промышленного внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 300 МВт // Электрические станции. 2010. № 2.
2. **Технический** отчет по результатам тепловых испытаний паровой турбины производства ЗАО «УТЗ» типа Т-250/300-240 (ст. № 8) (ОАО «Мосэнерго»). М., 2012.

Е.А. Рябцев, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ПОЛИРЯДНЫЙ ОСЕВОЙ НАСОС С МУЛЬТИПЛАННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

На вычислительно-производственной базе секции гидромеханики и гидравлических машин НИУ «МЭИ» разрабатываются гидроэнергетические машины для энергоблоков гигаваттного класса крупных ТЭС [1]. Одним из этапов проекта является синтез инновационных рабочих органов (РО) и нестандартных отводящих и подводящих устройств для эффективного функционирования энергетических насосов.

В качестве перспективного варианта можно отметить полирядные РО с мультипланной решеткой (рис. 1) на примере конденсатного насоса [2]. Нетрадиционная особенность РО имеет следующие обоснования: введение полирядной системы позволяет качественно снизить неравномерность и нестационарность поступающего потока; снижаются вибрации при работе насоса из-за уменьшения интенсивности возможных отрывных явлений в каналах проточных частей благодаря их меньшей продольной протяженности; повышаются антикавитационные качества гидромашин, что очень важно для энергетических насосов.

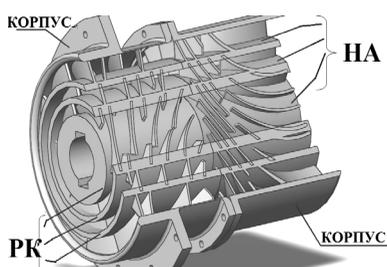


Рис. 1. Полирядные мультипланные рабочие органы в совокупности

жидкости (конденсата) в РО насоса для каждого ряда отдельно.

В настоящее время проводятся исследования, касающиеся технологии изготовления полирядных РО.

Рабочее колесо (ПК) и направляющий аппарат (НА) представляют собой единый картридж, который встраивается в корпус гидромашин, что повышает ремонтпригодность.

В рамках исследования были проведены следующие мероприятия:

- спроектирован конденсатный насосный агрегат, имеющий в своем составе подобные РО [1];

- с помощью программного обеспечения ANSYS смоделирован ток

### Литература

1. Моргунов Г.М. Разработка насосов нового поколения питательной системы мощных энергоблоков // Теплоэнергетика. 2013. № 2.

2. Моргунов Г.М., Рябцев Е.А. Полирядные осевые насосы с мультипланными рабочими органами // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 5.

*Р.О. Свиридов, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВХОДНОГО МОДУЛЯ ПОГРУЖНОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ ТЕКУЧИХ СРЕД**

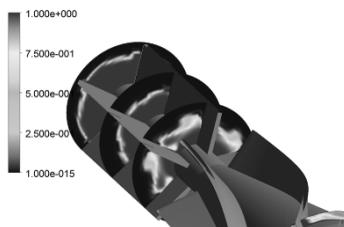
Широко используемые в России и за рубежом погружные насосные установки (ПНУ) при бесштанговой добыче из скважин нефти среднего и глубокого залегания в виде гетерогенной, многокомпонентной среды – пластовой нефтесодержащей жидкости (ПНЖ) – имеют ряд существенных недостатков, которые изложены в публикации [1].

Научно-технической задачей настоящей разработки являлось создание более надежной, долговечной и энергетически эффективной ПНУ при добыче нефти с высокими газовым, водным, абразивным и коррозионным факторами.

Проведенные ранее теоретические исследования, основные результаты которых приведены в публикации [2], подтверждают принципиальную работоспособность ПНУ на основе инновационной идеи о полирядном исполнении осевых ступеней [3].

На следующем этапе исследований в целях повышения степени достоверности и практической реализуемости, было поставлено и реализовано численное моделирование рабочего процесса входного модуля ПНУ в представлении гетерогенной, двухфазной текучей среды (рис. 1).

Анализ полученных данных в результате проведенных компьютерных экспериментов позволил детальной изучить механизм сепарации газа в проточной части разрабатываемой гидравлической машины.



**Рис. 1. Объемная доля газа в проточной части сепарационного барабана**

### **Литература**

1. **Свиридов Р.О., Моргунов Г.М.** Погружная насосная установка для сильно неоднородных текучих сред // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сборник тезисов докладов XVIII Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

2. **Свиридов Р.О., Моргунов Г.М.** Структурно-параметрический синтез предвключенного устройства для насосной установки // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: сборник докладов 16-й Всеросс. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательство МЭИ, 2012.

3. **Моргунов Г.М.** Полирядные лопастные машины с позитивным прогнозом конкурентно-способных свойств // Насосы&Оборудование. 2008. № 2(49).

*Н.А. Скороходов, студ.; рук. А.Е. Булкин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА ЭМУЛЯТОРА ЭЧСР ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-1100-60/1500-2М РОСТОВСКОЙ АЭС**

Эмулятор и математическая модель электрической части системы регулирования (ЭЧСР) турбины предназначены для выполнения наладки ЭЧСР и проверки ее взаимодействия с гидравлической частью системой регулирования (ГЧСР), а также с системой контроля и управления (СКУ) энергоблока перед выполнением пусковых операций. Отладка ЭЧСР с использованием эмулятора и математической модели позволит определить статические и динамические характеристики ГЧСР, исследовать режимы функционирования энергоблока в целом. Кроме того, эмулятор позволит определить устойчивость и быстродействие контуров управления в процессе взаимодействия ЭЧСР паровой турбины и СКУ энергоблока.

Функционирование эмулятора возможно в двух режимах: off-line и on-line.

В режиме off-line реализованы следующие модели: ЭЧСР (на базе реального проекта), ГЧСР, собственно турбины, парогенератора с главным паровым контуром, быстродействующей редуционно-охлаждающей установки (БРУ-К) и упрощенная модель автоматического регулятора мощности реактора. Режим off-line позволяет проводить испытания в замедленном масштабе времени.

В режиме on-line возможно выполнение наладочных работ реальной ЭЧСР. При этом эмулятор может функционировать как без воздействия на клапаны турбины (в этом случае команды отрабатывает модель ГЧСР), так и с воздействием на реальную ГЧСР. Последнее позволит настроить и проверить функционирование позиционеров регулирующих клапанов, усилителей электрогидравлических преобразователей, механизма токовой разгрузки (МТР), сигналов положения сервомоторов и МТР, проверку функционирования каналов противоаварийной автоматики, релейной блокировки и противоразгонной защиты.

В задачи, выполняемые эмулятором, также входит моделирование внешних сигналов для проверки основных эксплуатационных режимов: разворот турбины и ее включение в сеть, режим регулирования мощности, режим регулирования давления, сброс нагрузки и поддержание частоты вращения. Также возможно моделирование отклонения частоты вращения турбины для проверки режимов общего первичного регулирования частоты и нормированного первичного регулирования частоты.

*А.Д. Смирнов, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ АЭС С ВВЭР ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 1650 т/ч**

Актуальной задачей, стоящей перед атомной энергетикой, является повышение единичной мощности энергоблоков в сочетании с требованиями увеличения надежности и экономичности основного оборудования АЭС.

Одним из важнейших элементов АЭС является горизонтальный парогенератор (ПГ), от эффективности которого зависят показатели работы энергоблока. Главное требование, предъявляемое к ПГ – обеспечение низкой влажности отсепарированного пара. Ухудшение качества пара приводит к отложениям на лопатках турбины и их эрозионному износу, что в свою очередь оказывает непосредственное влияние на КПД турбины, надежность работы и тепловую экономичность блока в целом.

Разработка модернизированной конструкции парогенератора, которая улучшает гравитационную сепарацию пара за счет снижения теплогидравлической неравномерности и обеспечения равномерного отвода пара из ПГ, позволяет увеличить его тепловую мощность. Использование одноступенчатой схемы сепарации позволяет упростить конструкцию парогенератора.

К модернизированному ПГ предъявляется ряд требований:

- влажность пара перед потолочным дырчатым листом не более 0,2 %;
- диаметр корпуса не более 4,5 м;
- масса парогенератора не должна превышать 500 т;
- внутренний диаметр коллектора теплоносителя не менее 0,5 м.

Необходимость создания ПГ с низкой влажностью пара и одноступенчатой схемой сепарации предопределила принятие следующих решений:

- использование погруженного дырчатого листа для выравнивания поля скоростей пара на выходе с зеркала испарения;
- использование потолочного дырчатого листа для выравнивания скоростей пара в паровом объеме;
- подвод питательной воды по раздающим трубам в сторону более горячих теплообменных труб.

Автором выполнены тепловой и компоновочный расчеты ПГ, подтвердившие возможность получения требуемой влажности пара при использовании одноступенчатой схемы сепарации. Кроме того, автором проведены прочностной и гидравлический расчеты парогенератора. В ходе выполнения работы определена оптимальная скорость теплоносителя в трубах, при которой суммарные затраты (капитальные плюс эксплуатационные) являются минимальными.

Полученные габариты ПГ позволяют провезти его по железной дороге.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СЕПАРАЦИИ ВЛАГИ И ВДУВА ГРЕЮЩЕГО ПАРА ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ЗА РЕШЕТКОЙ**

Серьезным негативным фактором при работе последних ступеней конденсационных турбомашин, а также турбин АЭС, является наличие влаги в потоке пара. Частицы жидкой фазы, осевшие на поверхностях сопловых лопаток, образуют пленку, которая срывается с выходных кромок, формируя крупнодисперсную влагу, являющуюся источником эрозионного износа рабочих лопаток. В этой связи продление срока службы рабочих лопаток представляет собой важную инженерную задачу.

Как показали исследования, наиболее эффективными методами борьбы с жидкой пленкой на поверхности сопловых лопаток является внутрикапальная сепарация и вдув пара [1]. Внедряя данные методы, можно существенно уменьшить размер капель за направляющим аппаратом и их концентрацию. Эффективность этих способов борьбы с эрозионно-опасной влагой определяется целым рядом геометрических и газодинамических параметров. Перспективным направлением в данной области является применение комбинированной схемы при совместной работе сепарации пленки и вдува пара. Подобный подход теоретически должен эффективно снижать расход пленки на поверхности сопловой лопатки благодаря сепарационным щелям и разрушать оставшуюся крупнодисперсную влагу посредством вдува струи греющего пара.

В данной работе представлено исследование совместной работы сепарации и вдува пара, которые организованы на вогнутой поверхности профиля плоской изолированной сопловой решетки. Рассматривается влияние режимных параметров работы этих методов на структуру капельного потока за направляющим аппаратом. Для определения эффективности применения комбинированного подхода проводится сравнение с данными по решетке с гладкими профилями (без щелей). Определены оптимальные значения перепадов давления на сепарационные щели и давление вдуваемого пара, при которых проявляется наименьшее негативное аэродинамическое влияние на основной поток, но имеет место эффективная борьба с эрозионно-опасными каплями за решеткой.

### **Литература**

1. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.

*А.Б. Тхабисимов, асп.; рук. Л.И. Селезнёв, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ «МИШЕНЬ – ЭРОДЕНТ» ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Одной из задач исследований динамики абразивного износа твердым эродентом является установление наличия или отсутствия каких-либо периодов развития этого процесса.

В отношении абразивного износа существование инкубационного и переходного периодов экспериментально не установлено. В основном при проведении экспериментальных исследований фиксируется период с установившейся скоростью абразивного износа, что позволяет предположить следующее: инкубационный период весьма мал, и его участие в формировании дальнейшей динамики эрозионного износа незначительно. Различные результаты экспериментальных исследований процесса абразивного износа, получаемые в виде зависимостей количества массы материала, теряемой мишенью от времени экспонирования, не позволяют с достаточной определенностью сделать какие-либо выводы о наличии инкубационного и переходного периодов [1].

Сложность изучения процесса абразивного износа заключается в его статистическом характере вследствие того, что частицы твердого абразива (эродент) имеют различную форму, движутся в потоках несущей фазы (газ, жидкость и т.д.) по случайным траекториям и взаимодействуют с поверхностями лопаток турбомашин с различными скоростями и под разными углами. Поэтому необходим анализ поведения по времени статистических характеристик системы «мишень – эродент», а именно: распределения размеров твердых частиц (эродента) и «выбитых» частиц мишени после их взаимодействия.

В настоящей работе был проведен анализ статистических характеристик системы «мишень – эродент», а именно: оценок математического ожидания  $M$  (среднего значения), среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , коэффициента асимметричности  $Sk$  и эксцесса  $Ex$ . На основании полученных данных характеристик процесса абразивного износа было установлено, что в процессе абразивного износа имеется определенный период времени, который можно рассматривать как переходный этап эрозионного процесса к установившемуся периоду с постоянной скоростью износа.

### **Литература**

1. **An integrated** methodology for predicting material wear rates due to erosion / A. Gnanavelu, N. Kapur, A. Neville, J.F. Flores // Wear. No 267. 2009. P. 1935–1944.

*А.Б. Тхабисимов, асп.; рук-ли Л.И. Селезнёв, д.т.н., проф.;*  
*А.Ф. Медников, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

В процессе эксплуатации элементы проточных частей турбомашин подвержены различным видам износа, в том числе абразивному износу в результате воздействия твердых частиц, транспортируемых паром. В первую очередь это касается первых по потоку пара сопловых и рабочих лопаток в цилиндрах высокого и среднего давлений паровых турбин. Вследствие абразивного износа сокращается срок службы лопаточного аппарата, снижается экономичность ступени, возникает опасность поломок и аварийных ситуаций, возрастают затраты на восстановление и ремонт поврежденных элементов. Проблема абразивного износа функциональных поверхностей элементов турбомашин до сих пор сохраняет свою актуальность в связи с тем, что имеющиеся активные и пассивные способы борьбы с абразивной эрозией в полной мере ее не решают. Результаты исследований свидетельствуют о том, что одним из эффективных пассивных способов защиты рабочей поверхности лопаток является формирование защитных покрытий методом вакуумного ионно-плазменного напыления.

Для определения абразивной стойкости конструкционных материалов, и эффективности различного рода упрочнений и покрытий в НИУ «МЭИ» разработан и создан экспериментальный стенд, на котором моделируются условия взаимодействия абразивных частиц с поверхностью элементов энергетического оборудования. Полученные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований абразивной стойкости защитных ионно-плазменных покрытий показывают эффективность применения покрытий сложной слоистой структуры для повышения абразивной стойкости лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ. Выявлено, что в качестве защитных покрытий, повышающих абразивную стойкость исследуемых лопаточных сталей не менее чем в 2–3 раза, перспективно применение следующих материалов: титана, алюминия, хрома, никеля и др., а также их соединений с азотом и кислородом.

Промежуточные результаты работы получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.574.21.0011 от 17.06.2014 г. (уникальный идентификатор RFMEFI57414X0011).

Е.А. Тюшкина, Н.А. Ларин, студенты; А.А. Гусев, асп.;  
рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЖИДКУЮ ЧАСТИЦУ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ДИФFUЗОРНОМ ТЕЧЕНИИ

На основе экспериментально определенных распределений скорости в пограничном слое на плоской стенке при диффузорном течении и расчета составляющих уравнения движения в форме

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad (1)$$

проведен анализ изменения силовых факторов, действующих на элементарный жидкий объем по высоте пограничного слоя.

В (1)  $U$  – измеренная в эксперименте продольная составляющая средней скорости;  $V$  – поперечная составляющая, определявшаяся по уравнению неразрывности.  $X = x/L$  – относительная координата вдоль стенки длиной  $L$ ;  $Y = y/\delta$  – относительная координата по высоте слоя.

На рис. 1 показано изменение составляющих уравнения (1), а на рис. 2 – рассчитанное по уравнению (1) изменение касательного напряжения  $\tau(Y)$  по высоте слоя для разных сечений вдоль стенки.

Как видно, касательные напряжения внутри слоя сначала резко увеличиваются вблизи стенки, а затем уменьшаются до значений на внешней границе слоя.

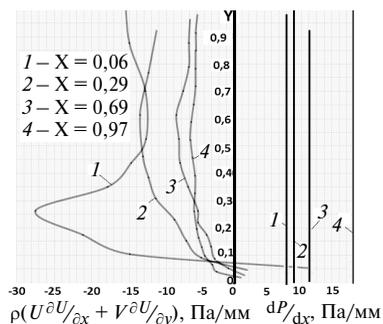


Рис. 1. Распределения составляющих уравнения (1) по высоте слоя

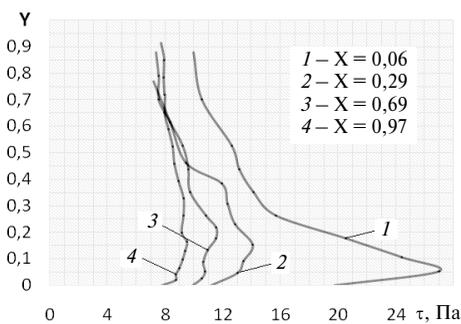


Рис. 2. Распределение величины  $\tau(y)$  по высоте слоя по длине стенки

*С.В. Хомяков, асп.; рук-ли А.А. Тищенко, к.т.н., доц.;  
И.Ю. Гаврилов, асс. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИКАНАЛЬНОГО ВДУВА ПАРА НА СРЕДНИЕ РАЗМЕРЫ И СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ЗА ИЗОЛИРОВАННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКОЙ**

В настоящее время актуальна проблема надежности и эффективности работы последних ступеней влажно-паровых турбин. Присутствие дискретных частиц жидкости в проточной части турбомашин приводит к появлению ряда негативных эффектов. Одним из них является эрозия поверхностей рабочих лопаток, вызываемая их взаимодействием с крупными каплями [1]. Перспективным направлением борьбы с эрозионно-опасной влагой является применение вдува перегретого пара через поверхность сопловых лопаток, который снижает интенсивность формирования водяной пленки – основного источника образования крупных капель перед рабочими лопатками.

В настоящей работе представлены результаты подробного исследования влияния параметров вдуваемого пара на характеристики жидкой фазы и на газодинамические характеристики профиля сопловых лопаток. Рассмотрены изменения скоростных характеристик, размеров, углов выхода дискретных частиц в зависимости от величины перепада давления на щель при различных режимных параметрах течения (начальной влажности, числе Маха, отношении плотностей сред). Выявлено комплексное (как тепловое, так и механическое) воздействие вдува перегретого пара на разрушение водяной пленки и формирование крупных капель за выходной кромкой.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории оптико-физических исследований НИУ «МЭИ» на пародинамическом стенде, позволяющем изучать течение перегретого, насыщенного и влажного пара в элементах проточных частей турбомашин в широком диапазоне режимных параметров.

Для визуализации движения потоков жидкой фазы и определения скоростных характеристик капель использовалась система лазерной диагностики, в которой реализован кросскорреляционный метод PIV, позволяющий определять мгновенные поля скоростей трассеров в потоке.

### **Литература**

1. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.

*Ю.С. Чудопал, студ.; рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА В ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ**

Расчеты эмиссии оксидов азота имеют большое значение при разработке и проектировании новых котлов и при модернизации и реконструкции действующих котельных агрегатов. В настоящее время для этого используются две расчетные методики [1, 2], которые реализуют различные подходы. Однако использование их на практике и в учебном процессе связано с заметными временными затратами и неудобствами при проведении вариантов расчетов.

Целью данной работы является разработка компьютерных программ расчета выбросов оксидов азота, реализующих указанные методики. При этом разрабатываемые программы должны удовлетворять следующим условиям:

- дружественный интерфейс;
- подсказки пользователю и проверка правильности ввода исходных данных;
- упрощенный ввод исходных данных при проведении вариантных расчетов;
- представление результатов в табличном и графическом видах.

В рамках данной работы выполнено сравнение результатов по выбросам оксидов азота для разных котлов и сжигаемых топлив, полученных с использованием обеих методик с целью определения их областей достоверности.

С помощью данных расчетных программ были разработаны технологические мероприятия для снижения образования оксидов азота при сжигании эстонских сланцев и ретортного газа в котле ТП-101 и определены оптимальные значения рабочих параметров.

Разработанные программы расчетов предполагается использовать в инженеринговых работах и в учебном процессе для выполнения типовых расчетов и дипломного проектирования.

### **Литература**

1. **РД 34.02.304–95.** Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ВТИ, 1996.
2. **Методические** указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. СО 153-34.02.304–2003. М.: ОАО «ВТИ», 2005.

## **ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ, НАДЕЖНОСТИ И КОНСТРУИРОВАНИЯ**

*Председатель секции — д.т.н., профессор В.П. Чирков*

*Секретарь секции — аспирант Ж.В. Зайкина*

*Р.Ю. Агафонов, асп.; рук. В.М. Матюнин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ДОБАВКАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗРАБОТКИ**

В настоящее время для определения механических свойств новых сплавов в процессе их разработки используют в основном метод испытания образцов на растяжение. Такой способ контроля опытного сплава требует большого расхода материалов и трудозатрат на изготовление образцов. При разработке нового сплава в лабораторных условиях зачастую оказывается сложным получить сплав высокого качества, содержащий минимум дефектов и имеющий равномерно распределенные по всему объему легирующие элементы и механические свойства. Следовательно, при испытаниях на растяжение имеется возможность оценки значений механических свойств сплава данного химического состава всего лишь в зоне повышенной концентрации дефектов. Этот фактор исключает возможность объективной оценки качества всего образца разрабатываемого сплава.

В связи с этим при разработке новых перспективных сплавов на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов автором был впервые использован метод индентирования с регистрацией кинетических диаграмм непрерывного вдавливания индентора. Проведение испытания индентированием выполнялось по методике НИУ «МЭИ» на автоматизированном приборе МЭИ-ТА с регистрацией диаграмм вдавливания в координатах нагрузка-глубина вдавливания индентора ( $P-\alpha$ ) [1]. Затем эта диаграмма вдавливания преобразовывается программными средствами в диаграмму растяжения в условных ( $\sigma-\delta$ ) координатах. В результате по диаграммам вдавливания и растяжения определяются следующие механические характеристики: модуль нормальной упругости  $E$ , условный предел

текучности  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление  $\sigma_B$ , предельная равномерная деформация  $\delta_{рав}$ , твердость по Бринеллю НВ.

Использование метода индентирования дает возможность определить анизотропию механических свойств и выявить наиболее слабые и наиболее сильные по прочности места в заготовке опытного сплава.

### **Литература**

1. **Матюнин В.М.** Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

*А.Ю. Андреев, Г.А. Матвеев, Ю.В. Обухова, студенты;  
рук. В.М. Мякишев, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОВТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ**

Процесс повторного зажигания и устойчивого горения электрической дуги определяется динамическими свойствами всей системы. Это обстоятельство приводит к тому, что для анализа процессов, протекающих в цепи во время повторного зажигания, необходимо выбрать математическую модель дуги системы и определить параметры источника питания. При малых токах для моделирования дуговых процессов удобнее использовать модель О. Майра [1–3].

Поскольку наибольшее распространение получила теория, в которой основной переменной электрической дуги является ее проводимость  $g$ , то чаще используется модель О. Майра в дифференциальной форме.

$$\frac{dg}{dt} + \frac{g}{\theta} = \frac{i^2}{Q_0}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $g$  – проводимость столба дуги;  $i$  – ток дуги;  $Q_0$  и  $\theta$  – параметры дуги.

С целью аналитического анализа процесса повторного возбуждения электрической дуги принята одноконтурная схема замещения источника питания с учетом влияния контура вихревых токов. При этом проводилась серия расчетов при изменении различных параметров сварочной цепи. При каждом их изменении повторен расчет переходного процесса, в результате которого определена скорость изменения напряжения на дуговом промежутке в момент времени  $t = 0$ . Расчет проведен средствами программного комплекса MathCAD и ядра символьных вычислений MuPAD.

Полученные расчетные параметры восстанавливающегося напряжения хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными индикаторным методом, основанном на теореме Тевенина [1].

### **Литература**

1. **Залесский А.М.** Электрическая дуга отключения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. **Лесков Г.И.** Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970.
3. **Мякишев В.М.** Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010.

Л.И. Ерёмин, студ. (НИУ «МЭИ»); И.Ю. Пугач, соиск. (ОАО «Корпорация ВНИИЭМ»); И.А. Мещихин, асп. (МГТУ им. Н.Э. Баумана);  
рук. А.Н. Воронцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ РАСКРЫТИЯ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Одним из этапов моделирования функционирования космического аппарата (КА) на орбите является расчет конструкции солнечной батареи (СБ) (рис. 1). Для создания точной модели требуется знание ряда параметров, определять которые приходится в ходе экспериментов.

В работе представлен алгоритм, позволяющий оценить параметры трения в механизмах раскрытия СБ при использовании минимального количества экспериментального оборудования. Полученные данные обработаны с помощью устойчивой оценки Ходжеса–Лемана [1], после чего использованы для создания модели СБ. Проведено сравнение экспериментально определенных ускорений створки в момент защелкивания (рис. 2) с ускорениями, полученными в ходе моделирования процесса раскрытия. Исследовано влияние коэффициента вязкого трения на напряжения в створке, сделаны выводы о прочности каркаса створок.

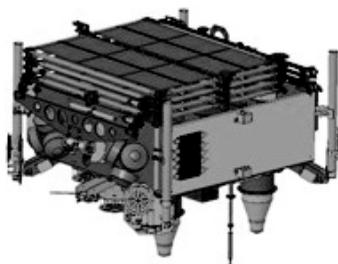


Рис. 1. Трехмерная модель исследуемого КА

Предложенный алгоритм может быть применен к типовым протяженным конструкциям с аналогичным принципом раскрытия, что позволит в короткие сроки провести экспериментальное определение или верификацию необходимых параметров без использования сложного оборудования.

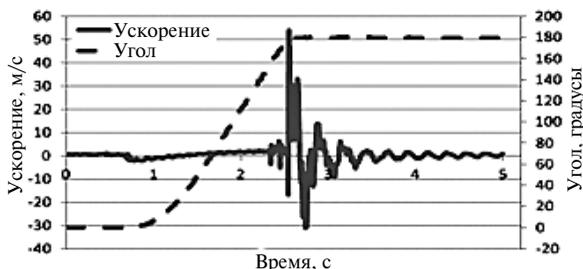


Рис. 2. Зависимость угла раскрытия створки и ее линейного ускорения от времени

### Литература

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

## **О ГРАНИЦЕ ФЛАТТЕРА В ЗАДАЧЕ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБЫ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ**

Среди классических примеров неконсервативных задач теории упругой устойчивости особое место в настоящее время занимает устойчивость прямолинейной формы участка трубопровода с протекающей жидкостью [1]. При определенных соотношениях между расходом жидкости и ее погонной массой в системе, определенным образом закрепленной, наступают динамическая неустойчивость. В работе [2] впервые была построена кривая на плоскости относительная масса жидкости – параметр расхода, которая отделяет область устойчивости от области флаттера. В дальнейшем аналогичная кривая была получена многими исследователями. Характерная особенность этой кривой заключается в том, что имеются участки немонотонной зависимости. Эту, не поддающуюся объяснению особенность, относили ряду парадоксов, которые характерны для неконсервативных систем. В работе [3], опубликованной в ведущем мировом журнале по теоретической и прикладной механике, предпринята попытка объяснить немонотонность границы флаттера недостаточной точностью вычислений и в зонах немонотонности имеют место скачкообразные изменения параметров системы.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы применением точного и приближенных методов, а также путем проведения широкого численного эксперимента показать, что немонотонность на некоторых участках – это неотъемлемая черта границы флаттера для участка трубы с протекающей жидкостью. Точный метод построения границы устойчивости основан на сведении решения краевой задачи к задаче минимизации функции многих переменных. Применяется метод Бубнова–Галеркина с разложением решения в ряды по формам собственных колебаний. При этом варьируется число членов ряда. В различных точках области параметров проводится непосредственное интегрирование уравнения возмущенного движения, в результате чего решается вопрос об устойчивости или неустойчивости системы при выбранных значениях параметров.

### **Литература**

1. **Болотин В.В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961.
2. **Gregory R.W., Paidoussis M.P.** Unstable Oscillation of Tubular Cantilevers Conveying Fluid // Proc Roy Soc Lond Math Physl Sci. 1966. Vol. 293. Issue 1435.
3. **Elishakoff I., Vittiri P.** A paradox of non-monotonicity in stability of pipes conveying fluid. // Teoret. Appl. Mech. Vol. 32. No 3.

Е.П. Кузьмин, асп. (НИУ «МЭИ»); А.Н. Серветник, вед. инж. (ФГУП ЦИАМ);  
рук. А.Н. Воронцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТРЕЩИН МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В ДИСКАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ТРАНСФОРМАЦИИ ФРОНТА ТРЕЩИНЫ

Малоцикловая усталость является основным повреждающим фактором дисков авиационных газотурбинных двигателей. Разрушение диска приводит к аварийной или катастрофической ситуации, поэтому разработка методов обеспечения его прочностной надежности является важнейшей задачей.

Методы назначения ресурса дискам основываются как на результатах натуральных циклических испытаний двигателя или его узлов, так и на расчетных оценках. В основе расчетных методов оценки ресурса лежит определение периода докритического роста усталостных трещин, что может составлять значимую часть общей циклической долговечности. Одним из определяющих факторов, влияющих на ресурс, является трансформация фронта трещины в процессе эксплуатации диска, что необходимо учитывать в расчетной модели.

В настоящей работе на основании модели устойчивого роста усталостных трещин [1] проведено численное моделирование кинетики трещин малоцикловой усталости в дисках АГТД. При определении коэффициентов интенсивности напряжений реализован алгоритм, позволяющий учитывать изменение геометрической формы трещины при ее развитии (рис. 1). Приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных при проведении циклических испытаний диска.

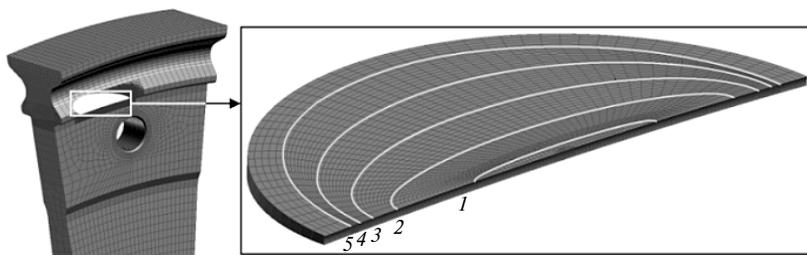


Рис. 1. КЭ сетка ободной части сектора диска АГТД с трещиной:  
1–5 – последовательные положения фронта трещины

### Литература

1. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных ГТД // Конверсия в машиностроении. 2005. № 4–5. ISSN 0869-6772.

## ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ ВДАВЛИВАНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА

Одной из актуальных задач в области механических испытаний материалов является установление корректных условий подобия, с помощью которых возможно проводить обоснованный пересчет механических характеристик, определяемых индентированием, на механические характеристики, определяемые растяжением образцов, на разных масштабных уровнях деформируемого объема. Одним из аспектов рассматриваемой задачи является сопоставление деформируемых объемов при этих видах испытаний. И если способ определения деформируемого объема металла при растяжении известен, то оценить его при индентировании существенно тяжелее.

В настоящее время известны теоретические способы оценки деформируемого объема металла под поверхностью отпечатка, полученного вдавливанием сферического индентора [1, 2]. Эти способы, по сути, представляют собой идеализированные модели распространения напряжений и деформаций под поверхностью отпечатков.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию распределения напряжений и пластических деформаций под поверхностью отпечатков, полученных вдавливанием сферического индентора  $D = 15,1$  мм с различными степенями деформаций. Расчет значений напряжений и деформаций металла под отпечатком проводился по распределению микротвердости HV1 металла с использованием принципов, изложенных в работе [3]. Все эксперименты и последующий анализ экспериментальных данных выполнялись непосредственно автором настоящей работы.

В результате были получены картины распределения напряжений и деформаций под отпечатками, рассчитаны значения деформируемых объемов и размеров деформированных зон, а также проведено сравнение с результатами известных аналитических исследований. Новизна полученных результатов состоит в установлении характера зависимости деформируемого объема металла от геометрических параметров отпечатка. Эти данные будут заложены в основу новой методики определения механических характеристик материалов вдавливанием индентора, разрабатываемой на кафедре технологии металлов НИУ «МЭИ».

### Литература

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989.
2. Giannakopoulos A.E., Suresh S. Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation // Scripta Materialia. 1999. Vol. 40. No 10. P. 1191–1198.
3. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ГРУБЫХ ПОСАДОК САМОЛЕТА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИСШЕСТВИЯ

Распространенная на сегодняшний день методика оценки повреждений и принятия решения о дальнейшей судьбе самолета после совершения им грубой посадки основывается на двух параметрах (перегрузка в центре тяжести и посадочная масса). Такой подход требует значительного усовершенствования, ввиду того, что в некоторых случаях сложная комбинация нагрузок может привести к наступлению предельного состояния отдельных узлов и агрегатов самолета при уровне вертикальной перегрузки в центре тяжести ниже предельной.

В работе представлено существенное усовершенствование методики определения повреждений введением в рассмотрение широкого спектра параметров, определяющих условия приземления (поступательные и угловые скорости, ориентация самолета, вес и центровка и др.). Метод разрабатывался и тестировался на основе упругомассовой модели самолета Ту-204СМ (рис. 1) с учетом всех нелинейных процессов в системе амортизации [1]. Расчеты выполнены в системе MSC.Adams.

Основной целью работы является получение на основе анализа широкого спектра расчетных случаев зависимости нагрузок от условий приземления. Такая зависимость позволяет надежнее выявлять поврежденность элементов конструкции планера по данным МСРП непосредственно после приземления без привлечения разработчика и необходимости проведения численного моделирования инцидента, что значительно повысит оперативность принятия решений и эффективность эксплуатации воздушного судна.

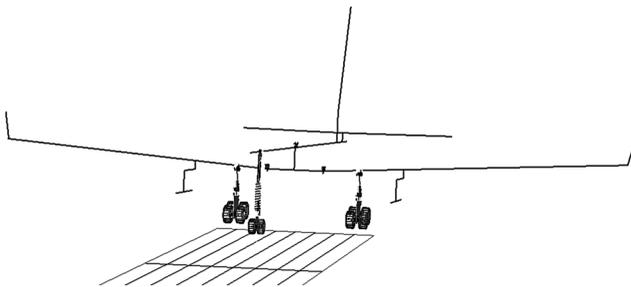


Рис. 1. Математические модели самолета и стоек шасси

### Литература

1. Рыбин А.В. Исследование динамики посадки пассажирского самолета // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 74.

*А.А. Сахапов, студ.; рук-ли И.В. Ившин, д.т.н., проф.;*  
*Н.В. Денисова, к.ф.-м.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)*

## **ЛЕПЕСТКОВЫЕ ДИАГРАММЫ И ПОЛНАЯ МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

Работа посвящена комплексному исследованию трансформаторного масла. Особое внимание было уделено графическому представлению физико-химического анализа и хроматографического анализа трансформаторного масла (ХАРГ), и преимуществу их совместного использования. Проблема существующих способов интерпретации результатов ХАРГ заключалась в недостаточной информативности и наглядности. Для ХАРГ авторами предложена лепестковая диаграмма, по осям которой откладываются концентрации растворенных в масле газов, характеризующих определенный вид дефекта. В соответствии с причиной возникновения растворенных газов (дефект термического характера или электрического) на диаграмме выполнялась группировка осей на эти две подгруппы, что упрощает визуальную оценку результатов. Также проверка осуществлялась по алгоритму, разработанному на основе РД153-34.0-46.302-00 [1].

Значительное внимание уделяется представлению физико-химического анализа; для него строится лепестковая диаграмма, по пяти наиболее важным показателям: кислотному числу, влаге, температуре вспышки, тангенсу угла диэлектрических потерям при 90 °С, средней диэлектрической прочности.

В заключение работы представляется полная автоматизированная программа по представлению результатов диагностики трансформаторного масла по ХАРГ и физико-химическому анализу. Авторами был написан макрос в программе Microsoft Excel, состоящий из двух разделов, в котором операции, проводимые пользователем, минимизированы. В первом разделе строится лепестковая диаграмма по ХАРГ и сравнивается с заданной диаграммой с отмеченными областями, тут же осуществляется проверка по алгоритму. Во втором разделе строится лепестковая диаграмма по данным физико-химического анализа, на ней же отмечены контуры «норма» и «интервал 5 % допуска», относительно которых можно визуально оценить состояние трансформаторного масла.

Результатом данной работы явились автоматизированная обработка данных, позволяющая представить в более информативном виде концентрации растворенных в трансформаторном масле газов.

### **Литература**

1. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по ХАРГ. М.: АО ВНИИЭ, 2001.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

При расчете строительных конструкций на сейсмостойкость волновое поле в основании сооружения обычно усредняют и рассматривают в виде вектора, состоящего из компонент поступательного и ротационного движения, приложенного в центре пятна фундамента. Такой интегральный подход широко используется в современных строительных расчетах на сейсмостойкость. Описание процедуры получения расчетных параметров для интегрального подхода приводится в [1, 2]. Однако возведение строительных сооружений и конструкций, отличающихся протяженными размерами в плане (мосты, плотины, трубопроводы, дамбы и т.д.), когда в пределах основания укладывается несколько длин доминирующих сейсмических волн, требует учета эффекта продвижения волны. Для протяженных расчетных схем необходимо использовать дифференцированную модель сейсмического воздействия в виде поля перемещений, скоростей и ускорений грунта, определенного в каждой точке пространства. Дифференцированный подход позволит уточнить конструктивные решения при возведении объекта, повысить надежность сооружения.

Настоящая работа посвящена вопросу получения поля кинематических параметров на основе численного моделирования продвижения поверхностных сейсмических волн Рэлея и Лява по поверхности земли, а также исследованию влияния параметров грунта на характеристики волнового процесса. Актуальность работы обусловлена тем, что методика расчета по дифференцированной схеме находится в стадии развития и не имеет законченного вида. В частности, для расчетов на сейсмостойкость необходимы пространственно-временные законы движения поверхности грунта. Новизна работы заключается в учете эффекта продвижения волны под сооружением. Результаты будут использованы для получения расчетных характеристик сейсмического воздействия, для моделирования и анализа динамического отклика строительных конструкций.

### **Литература**

1. **Позняк Е.В.** О расчетах на сейсмостойкость с программным обеспечением «Еврософт Одиссей» // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». 2013. № 5.
2. **Позняк Е.В.** Автоматизация инженерных расчетов на сейсмостойкость // ИНФОРИНО-2014. Международная научно-методическая конференция: сборник докладов. М.: Издательство МЭИ, 2014.

*С.Ю. Соловьёв, студ.; рук-ли А.Н. Демидов, ст. преп.;  
М.А. Каримбеков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕРДЕЧНИКОВ МАГНИТОПРОВОДНЫХ НАКЛАДОК**

Актуальность данной работы заключается в разработке новой изолирующей накладкой, которая бы обеспечивала жесткость и способность стыкового соединения выдерживать поездные нагрузки, обеспечивая нормальное функционирование стыка, а также надежное сопротивление электрической изоляции и уменьшение напряженности магнитного поля в стыке.

Целью данной работы является разработка технологического процесса и управляющей программы для производства сердечников магнитопроводных накладок.

Объектом исследования являются изолирующие накладки для болтовых стыков рельсов.

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

1) Разработана управляющая программа для обработки накладок с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Создание управляющей программы (УП) проводилось в CAD/CAM/CAPP-системе ADEM с последующей симуляцией механической обработки и отладкой в редакторе управляющих программ SIMCO.

2) Создана модель накладки по исходному чертежу в CAD-системе SolidWorks.

3) Составлен технологический процесс в CAPP приложении к CAD-системе SolidWorks – SWR Технология.

Личным участием и вкладом являются разработанная управляющая программа для обработки накладок с использованием САПР и разработанный технологический процесс для изготовления магнитопроводных накладок «АпАТЭК Р65М» для сборных изолирующих стыков железнодорожных рельсов типа Р65, которые служат для обеспечения электрической изоляции одного блок-участка железнодорожного пути, оборудованного рельсовыми цепями, от другого.

Разработанное изделие успешно прошло тестовые испытания, что говорит о правильности, обоснованности и перспективности принятых технических решений при проектировании и производстве данного изделия.

*Р.В. Чухлебов, асп.; рук. В.Е. Хроматов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТА АВИАЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

В работе представлены методика и результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенной конструкции отсека корпуса авиационного изделия, состоящей из конической подкрепленной оболочки с присоединенным оперением, при стационарном гармоническом нагружении.

Экспериментальное исследование вибрации хвостового отсека проводилось в лабораторных условиях с использованием измерительно-вычислительного комплекса с системой управления виброиспытаниями. При установке отсека на стол вибровозбудителя использовалось спроектированное специальное крепежное приспособление, обеспечивающее условия закрепления, близкие к реальным, и отсутствие искажения вибрационного сигнала. Режим вибрационного нагружения задавался и поддерживался по показаниям датчика ускорения установленного на приспособлении.

Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик проводилось с использованием метода плавного изменения частоты синусоидальных колебаний в диапазоне частот от 0 до 300 Гц [1, 2]. В качестве отклика на возбуждение рассматривалось значение виброускорения, действующие на оперение в направлении входного вибрационного воздействия.

Вибрационные испытания проводились при воздействии синусоидальной вибрации методом фиксированных частот на диапазоне от 10 до 300 Гц [1, 3]. Тензорезисторы устанавливались в зонах действия максимальных уровней вибронпряжений. Результаты испытаний в дальнейшем будут сравниваться с результатами численного моделирования НДС.

### **Литература**

1. **Сидоренко А.С.** Методы и средства испытаний и контроля: учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2005.
2. **ГОСТ 30630.1.1–99.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. М.: Изд-во стандартов, 2000.
3. **ГОСТ 30630.1.2–99.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. М.: Изд-во стандартов, 2000.

## РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — зав. каф. Тер мех.,  
д.т.н. И.В. Меркурьев

Секретарь секции — к.ф.-м.н., доцент Г.В. Панкратьева

Б.И. Адамов, асп.; А.В. Князев, студ.;  
рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ФИЛЬТРАЦИИ В ЗАДАЧЕ ПОГОНИ

В работе строится алгоритм погони мобильного колесного робота (рис. 1) за подвижным объектом. Подобные задачи актуальны в области транспортировки грузов, управления автономными автомобилями и пр.

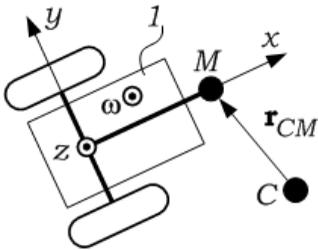


Рис. 1. Схема мобильного робота

Цель управления состоит в совмещении положения характерной точки платформы робота  $M$  и центра объекта  $C$  (см. рис. 1). Система технического зрения робота позволяет в режиме реального времени отследить положение мишени относительно платформы, т.е. найти проекции вектора  $\mathbf{r}_{CM}$  на оси системы координат  $x, y, z$ , движущейся вместе с платформой  $I$  (см. рис. 1).

Для решения поставленной задачи использовался следующий алгоритм расчета требуемого вектора скорости  $\mathbf{V}_M$  точки  $M$ :

$$\mathbf{V}_M = \sigma \mathbf{v}, \quad \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\sigma(k_2 \mathbf{v} + k_1 \mathbf{r}_{CM}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}$  — вспомогательный вектор;  $k_{1,2} > 0$ ,  $\sigma > 0$  — коэффициенты усиления, причем чем больше значение параметра  $\sigma$ , тем точнее точка  $M$  будет повторять движение точки  $C$ . Данный алгоритм является обобщением метода фильтрации, примененного в статье [1].

Учитывая вращение платформы, в проекциях на оси  $xuz$  соотношение (1) принимает вид

$$V_{Mx} = \sigma v_x, \dot{v}_x - \omega_z v_y = -\sigma(k_2 v_x + k_1 r_{CMx}),$$

$$V_{My} = \sigma v_y, \dot{v}_y - \omega_z v_x = -\sigma(k_2 v_y + k_1 r_{CMy}),$$

где  $\omega_z$  – угловая скорость платформы.

Описанный алгоритм реализован на базе колесной платформы *Robotic Starter Kit 2.0* компании *National Instruments*.

### Литература

1. **Бобцов А.А.** Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 2002. Т. 35. № 11.

*И.С. Аксёнов, студ.; рук. Н.В. Осадченко, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ МОНТАЖНО-СБОРОЧНОГО РОБОТА В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS**

Большинство современных промышленных роботов относится к классу роботов-манипуляторов. С 1930-х гг. в связи с автоматизацией производства роботы-манипуляторы стали наряду с традиционными средствами автоматизации технологических процессов применять в промышленности (в частности, в мелкосерийном производстве и особенно в цехах с вредными условиями труда) [1].

В данной работе проведено исследование кинематики монтажно-сборочного робота; по своей конструкции этот робот представляет собой простую кинематическую цепь, каждое из шести сочленений которой приводится в движение серводвигателем.

Разработана программа на языке программирования **Turbo C** [2], способная путем решения обратной задачи кинематики вычислить законы изменения координат в сочленениях при выполнении роботом заданного программного движения [3]. В системе автоматизированного проектирования **SolidWorks** [4] построена модель исследуемого робота, что включает разработку описаний элементов звеньев робота и объединение их в сборку. После этого с использованием найденных до этого законов изменения координат в сочленениях выполнено компьютерное моделирование программного движения монтажно-сборочного робота с визуализацией процесса движения средствами компьютерной анимации.

Методику проведенного исследования и полученные в ходе его результаты можно использовать при разработке роботов на ранних этапах проектирования с целью определения возможности осуществления данным роботом поставленной задачи.

### **Литература**

1. **Попов Е.П., Письменный Г.В.** Основы робототехники: Введение в специальность. М.: Высшая школа, 1990.
2. **Культин Н.Б.** Основы программирования в Turbo C++. СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
3. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.
4. **Дударева Н.Ю., Загайко С.А.** SolidWorks 2009 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

*Т.В. Бочков, студ.; рук. Н.В. Осадченко, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИГРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В ВИРТУАЛЬНЫЙ ФУТБОЛ**

Виртуальный футбол – это соперничество между программами и алгоритмами, реализующими групповое поведение команд роботов футболистов. Исследования в области виртуального футбола активно велись в последние годы (включая организацию международных и национальных чемпионатов) и рассматривались в качестве одного из приложений теории искусственного интеллекта.

При проведении чемпионатов по виртуальному футболу организаторы предоставляют в распоряжение участников, создающих конкретные игровые программы, среду моделирования и вспомогательные ресурсы [2]. В этой среде моделирования мобильные роботы рассматривались как неголономные механические системы, уравнения динамики которых представляют собой уравнения Чаплыгина [1].

Выполненное исследование включает в себя создание алгоритмов, преследующих целью применение усложненной игровой тактики, которая, в частности, предполагает возможность проведения контратак командой роботов футболистов; эти алгоритмы были реализованы в программе **KontrAttack**. В результате в данную программу был внесен по сравнению с другими известными игровыми программами ряд усовершенствований.

Для проверки эффективности предложенных усовершенствований были проведены серии матчей, в которых программа **KontrAttack** играла против известных программ «Т.О.Р.», «Серебряные Акулы» и «Днепр». Во всех трех сериях число матчей, закончившихся победой программы **KontrAttack**, существенно превосходило число проигранных матчей.

### **Литература**

1. Зацепин М.Ф., Мартыненко Ю.Г., Тиньков Д.В. Уравнения Лагранжа, Воронца, Чаплыгина в задачах динамики мобильных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. **Официальный сайт** проекта «Виртуальный футбол» <http://www.keldysh.ru/>

*А.А. Ермаков, студ.; рук. В.И. Голубев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРКОВКОЙ АВТОМОБИЛЕЙ**

Возрастающее число автомобилей в больших городах создает проблему, связанную с нехваткой места для их парковки. Частичным решением данной проблемы может стать строительство многоуровневых автоматических паркингов, в которых автомобили располагаются на нескольких этажах по окружности.

Данная работа посвящена разработке систем лифтовых подъемников. Предложена кинематическая схема привода подъема. В качестве исполнительных органов использованы гидромоторы, валы которых соединены с понижающими редукторами. Для преобразования вращательного движения валов гидромоторов в поступательное движение платформы лифта используется цепная передача. Также в схеме предусмотрены противовесы, прикрепленные к концам цепей, которые берут на себя часть нагрузки при движении платформы.

Был проведен выбор гидравлических схем, обеспечивающих вертикальное движение платформы. В качестве двух наиболее приемлемых вариантов для дальнейшего исследования были выбраны схемы с частотным и машинным регулированием скорости исполнительных органов.

Для определения статических и динамических характеристик гидropередач были созданы математические модели приводов с помощью библиотеки SimHydraulics из среды MatLab Simulink. Рассматривались такие показатели, как быстродействие, перерегулирование, статическая ошибка, ошибка позиционирования, а также изменение давления в напорных гидрролиниях приводов и момента сопротивления на валах гидродвигателей.

Исходя из полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что частотное регулирование гидropередачи не уступает по своим показателям качества машинному регулированию при использовании данных схем. Машинное регулирование является более точным, но в то же время и более дорогим и сложным способом регулирования скорости в гидropередаче. Отличия показателей качества двух рассмотренных систем были не столь значительными, поэтому применение гидropривода с частотным регулированием в качестве гидравлического лифта будет более целесообразным.

Работоспособность системы управления парковкой проверена с помощью программы Festo FluidSIM-H и программируемого логического контроллера Siemens SIMATIC S7-300.

Работа выполнена автором в Центре подготовки «МЭИ-Фесто».

## **КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАРСОХОДА ТИПА «SPIRIT»**

Данная работа посвящена исследованию и компьютерному моделированию движения шестиколесного мобильного робота типа «Спирит». Это первый марсоход из двух запущенных США в рамках проекта Mars Exploration Rover. Его близнец «Оппортунити» был доставлен тремя неделями позже в другой район Марса. Главной целью научной миссии обоих роевров – поиск и исследование камней и почв, которые могут содержать данные о прошлой деятельности воды на Марсе [3]. Поэтому исследование кинематики ровера подобного типа является актуальной задачей. Рассматриваемый в данной работе робот – это механическая система, обладающая 37 степенями свободы, из них 18 степеней подвижности имеет ходовая система, манипулятор с буровым устройством – 8, панорамная камера и антенны – 6, панели солнечной батареи – 5 [1]. Для выполнения поставленной перед аппаратом задачи он оснащен горным инструментом бурения, позволяющим создавать углубления в камне диаметром 45 мм и глубиной 5 мм. Блок с названным инструментом расположен на манипуляторе и весит 720 г, в нем находится и спектрометр, позволяющий проводить исследование минералогии железосодержащих пород. Марсоход работал гораздо дольше, чем запланированные 90 суток (марсианских солнечных суток). Благодаря очистке солнечных батарей естественным ветром Марса выработка электроэнергии значительно повысилась, из-за чего «Спирит» продолжал эффективно функционировать долгое время, в конечном итоге значительно превысив запланированный срок службы. «Спирит» проехал 7,73 км вместо запланированных 600 м, что позволило сделать более обширные анализы геологических пород Марса [3]. Компьютерное моделирование (как движения марсохода, так и его манипулятора с бурильным устройством) осуществлено при помощи программного комплекса **UM**, и включает решение ряда прямых и обратных задач кинематики на различных фазах движения ровера и его манипулятора [2].

### **Литература**

1. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.
2. **Погорелов Д.Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 1997.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Mars\\_Exploration\\_Rover](https://ru.wikipedia.org/wiki/Mars_Exploration_Rover).

*А.И. Иванов, студ.; рук. В.Ф. Устинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ДИНАМИКА УПРУГОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО УПРУГИМ НАПРАВЛЯЮЩИМ**

Данная работа посвящена моделированию динамики упругого мини-робота, относящегося к новому классу мехатронных устройств. Подобные роботы могут быть использованы, например, для диагностики состояния внутренней поверхности кровеносных сосудов.

В рассматриваемой модели предполагается, что мини-робот движется по упругим направляющим, образующим систему пролетов на упругом основании с шарнирным закреплением криволинейных стержней, невозмущенная форма которых представляет собой периодическую кривую. Движущими силами являются консервативные силы упругого трехопорного неразрезного стержня, управляющие его формой воздействия, создаваемые с помощью пьезоэлектрических элементов.

Квазистатическая характеристика пьезопривода определяется при решении задачи о цилиндрическом изгибе триморфной (пьезокерамика – металл – пьезокерамика) прямоугольной пластины при электрических нагрузках.

Для определения упругих перемещений направляющих строится решение модельной задачи о деформации шарнирно закрепленного стержня на упругом основании под действием сосредоточенных сил в квазистатической постановке.

При моделировании динамики система робот–направляющие рассматривается как механическая система с распределенными жесткостями и сосредоточенными и распределенными массами. При описании движения используется формализм Лагранжа [1].

В работе рассматривается управляемое движение робота при наличии сил вязкого трения, управляющие воздействия формируются по специальному алгоритму в зависимости от изменения кривизны направляющих в невозмущенном состоянии.

Численным методом интегрирования получено решение дифференциальных уравнений, описывающих движение мобильного робота. Показано, что время его выхода в квазиустановившийся режим, средняя квазиустановившаяся скорость и уровень ее неравномерности зависят от упруго-массовых характеристик направляющих и основания.

### **Литература**

1. Журавлёв В.Ф. Об одной модели механизма движения змеи // ПММ. 2002. Т. 66. Вып. 4.

*В.А. Кирик, М.Б. Цветков, студенты; рук. И.В. Орлов, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОДУЛЬНОГО РОБОТА БИБЛИОТЕКАРЯ**

В работе проводится исследование математической модели робота-библиотекаря, собранного из отдельных модулей. Описывается конструкция, объясняется назначение каждого модуля, приводятся их характеристики.

Уравнения движения робота строятся в виде уравнений Лагранжа 2-го рода [1] с учетом динамики двигателей электроприводов. Проводится оценка максимальных рабочих моментов в приводах, на основании которой формируются рекомендации по выбору электродвигателей. Описаны алгоритмы работы устройства [2] с учетом пространственных ограничений рабочей зоны робота.

Для управления устройством используются микроконтроллерные платы «Arduino», управление электродвигателями осуществляется с помощью разработанных авторами драйверов. Для написания программного обеспечения используется язык программирования С.

Приводится блок-схема управляющей программы.

### **Литература**

1. **Яблонский А.А.** Курс теоретической механики. Часть II. Динамика. М.: Высшая школа, 1966.
2. **Рогач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для студентов вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РОБОТА ТИПА EXPLINER ПРИ ОБХОДЕ ИМ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ОПОРАХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛЭП

Работа посвящена исследованию колебаний робота при его подходе к мачте опоры, удерживающей провода линий электропередач. Робот типа EXPLINER предназначен для автоматизации обследования состояния проводов ЛЭП, что является важной и актуальной задачей. Кинематика движения робота вдоль линий электропередач и обход им препятствий в виде крепежа проводов на мачте опоры подробно излагается в работе [1].

Зависнув на одной каретке, робот находится в положении равновесия, центр тяжести системы расположен в точке касания каретки с контактной линией провода (рис. 1). Раскачивание робота возможно в случае внешнего воздействия, например, ветровой нагрузки. В данной работе исследовано поведение робота, зависшего на одной каретке, передвигающегося вдоль линии передачи и подвергающегося воздействию ветровой нагрузки, а также проведен анализ условий, при которых допустима эксплуатация робота с учетом автоматизированного управления его движением. Для исследования колебаний робота построена система дифференциальных уравнений движения с использованием уравнений Лагранжа 2-го рода [2] для модельной задачи с двумя степенями свободы.

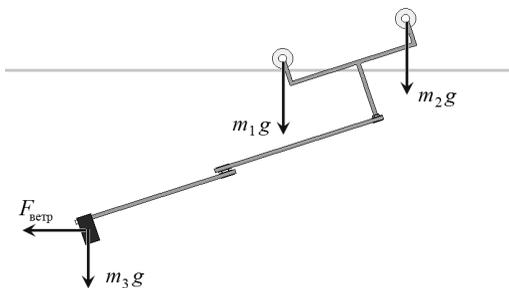


Рис. 1. Конструктивная схема робота при обходе препятствия

### Литература

1. Киселёва А.В., Корецкий А.В. Кинематический анализ робота типа EXPLINER для сканирования высоковольтных ЛЭП // Радиозлектроника, электроника и энергетика: XX междунар. НТК студентов и аспирантов (27–28 февраля 2014, Москва): Тезисы докладов. В 4-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 4.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: учебник. СПб.: Лань, 2002.

*А.А. Козельских, студ.; рук. В.Ф. Устинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЗИЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ВРАЩЕНИЯ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ НАКАТОМ ЛЕНТЫ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

Планарные позиционные устройства с электростатическим накатом являются перспективой для современных микромеханических приборов. Моделирование их работы является важной составной частью процесса разработки конструкции таких устройств.

Данная работа посвящена исследованию позиционного устройства вращения, составной частью которого является система четырех микроактюаторов с электростатическим накатом упругой металлической ленты на сигнетоэлектрическую пленку.

Неподвижный электрод, находящийся под пленкой, и подвижный электрод металлического лепестка, имеющего малую жесткость на изгиб, образуют конденсатор переменной емкости.

Рассматриваются две конструктивные схемы позиционного устройства:

- концентрическое расположение поверхностей ротора и статора;
- наличие малого эксцентриситета поверхностей наката и внутренней поверхности ротора.

Моделирование динамики данного позиционного устройства включает в себя: определение областей допустимых движений; расчет электростатического давления, действующего на ленту, в предположении о форме силовых линий как комбинации участков постоянной, но различной кривизны; построение системы уравнений продольно-поперечного изгиба ленты; их решение в первом приближении с помощью соответствующих процедур асимптотических разложений [1]; составление и численное интегрирование дифференциального уравнения вращения ротора с нелинейной правой частью.

В процессе решения данной задачи выяснилось, что необходимо уточнение начального положения ленты.

Численный анализ показал, что при увеличении инерционных параметров в 3 раза в первой схеме максимальный угол поворота не изменяется, но угловая скорость уменьшается на 30 %. При увеличении эксцентриситета максимальный угол поворота и угловая скорость увеличиваются.

### **Литература**

1. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Анализ динамики разгона и квазиустановившегося режима электростатического планарного устройства // Вестник МЭИ. 2012. № 1.

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНКОДЕРОВ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАЛЬНОМЕРА

Автономно управляемые мобильные роботы используются в различных областях, особенно для работы в недоступных для людей местах (зараженные территории, другие планеты и др.). Создание таких роботов требует решения целого ряда задач, начиная от разработки механической конструкции, подбора исполнительных устройств и навигационных датчиков, до составления программ, реализующих построенный в соответствии со стоящей перед роботом задачей алгоритм движения.

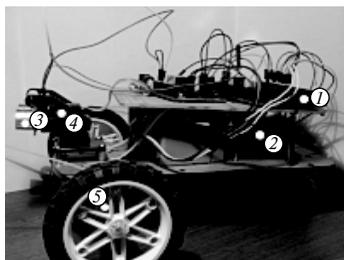


Рис. 1. Вид мобильного робота

Целью авторов разработки было создание автономно управляемого робота с нуля. Результатом проделанной работы стал двухколесный робот (рис. 1) на аппаратной вычислительной платформе Arduino, использующий плату 1 (рис. 1) Arduino Mega 2560 и моторный модуль 2 L298. В качестве средств навигации были применены ультразвуковой датчик 3 HC-SR04, способный вращаться благодаря сервомашинке 4 SG90 и позволяющий обнаруживать и отслеживать препятствия и определять расстояние до них, а также

двигатели с энкодерами 5 Maxon, осуществляющими контроль пройденного роботом расстояния.

Конструктивные возможности робота позволяют решать задачи по объезду препятствий и поиску проходов в условно бесконечной стене. Для решения этих задач были разработаны соответствующие алгоритмы и программы. На этапе программной реализации были использованы материалы тематических электронных ресурсов [1, 2].

Рассматривался вариант управления с использованием цифрового компаса HMC5883L в качестве средства навигации, однако из-за его сильной магнитной зависимости, результатом которой была неточность показаний, этот вариант был исключен.

### Литература

1. URL: <http://www.robocraft.ru>
2. URL: <http://www.psurobotics.org/wiki>

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРОГИБА СИММЕТРИЧНОЙ СЛАБОВСПАРУШЕННОЙ БАЛОЧНОЙ ФЕРМЫ

В практике часто применяют фермы с небольшим отклонением линий поясов от горизонта (вспарушенные фермы). Назначение таких отклонений (подъемов) состоит и в придании конструкции большей жесткости, и в устройстве покатоности покрытия для водоотвода осадков (если речь идет о покрытии здания). Пользуясь естественным в таких задачах малым параметром, удалось получить новое аналитическое решение для прогиба фермы от действия сосредоточенной в центре силы (рис. 1). Актуальность поставленной и решенной задачи состоит в необходимости выполнения точных расчетов для большого числа элементов конструкции, где, как известно, существует трудность преодоления естественной потери точности расчетов с повышением размера разрешающей матрицы. Это особенно важно в расчетах легких конструкций антенн, выводимых в космос. Все преобразования проводились в системе Maple [1, 2] методом индукции с использованием операторов `rgf_findrecur` и `rsolve` [3, 4].

Зависимость прогиба, отнесенного к  $P/EF$ , от числа панелей и различных значений  $\varepsilon$  дана на рис. 2. Заметно, что оптимальное значение числа панелей почти не зависит от подъема верхнего пояса.

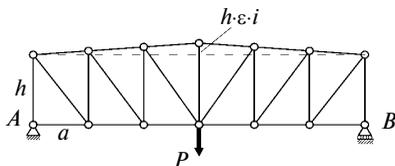


Рис. 1. Пример конструкции при  $n = 3$

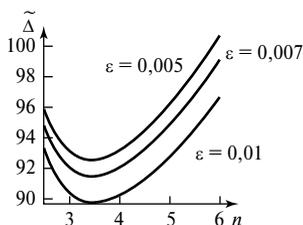


Рис. 2.  $h = 7$  м,  $L = 40$  м

### Литература

1. Кирсанов М.Н. Решебник. Теоретическая механика / под ред. А.И. Кириллова. М.: Физматлит, 2008.
2. Кирсанов М.Н. Maple и MapleT. Решения задач механики. СПб.: Лань, 2012.
3. Кирсанов М.Н. Скрытая особенность и асимптотические свойства одной плоской балочной фермы // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 4.
4. Кирсанов М.Н. Индуктивный анализ влияния погрешности монтажа на жесткость и прочность плоской фермы // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 5(31).

*Е.Д. Санникова, студ.; рук. А.В. Корецкий, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО РОБОТА ЛУНОХОДА**

Работа посвящена моделированию движения четырехколесного мобильного робота (ровера), автономно перемещающегося в соответствии с заданной программой.

Рассматриваемый робот-луноход несет на себе вспомогательное оборудование: манипулятор, блок видео, панели солнечной батареи и антенну. Робот представляет собой механическую систему, имеющую 36 степеней свободы (при этом ходовая часть обладает 20 степенями свободы, манипулятор – 6 степенями свободы, блок видео – 4 степенями свободы, панели солнечной батареи в совокупности имеют 4 степени свободы, антенна – 2 степени свободы).

Актуальность заключается в том, что в данной работе рассматривается исследовательский ровер, который ориентирован для участия в программе не правительственного конкурса Google Lunar X PRIZE [1].

Основные положения конкурса: мягкая посадка (из-за необходимости сохранить исследовательское оборудование); передвижение по поверхности Луны не менее 500 м; передача изображения порядка 500 Мбайт за два сеанса связи и доставка на поверхность Луны полезного груза массой в 500 г (эмблема конкурса).

Компьютерное моделирование (как движения лунохода, так и работы его вспомогательного оборудования) осуществлено при помощи программного комплекса UM [2, 3]; оно включает решение ряда прямых и обратных задач геометрии движения на различных фазах движения ровера, а также работы его манипулятора, захватывающего грунт с поверхности Луны и доставляющего его на борт.

### **Литература**

1. <http://www.latercera.com/noticia/tendencias/2013/02/659-508738-9-conoce-los-rovers-que-viajaran-a-la-luna-en-la-competencia-google-lunar-x.shtml>.
2. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.
3. **Погорелов Д.Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 1997.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОХОДКИ ИНСЕКТОМОРФНОГО РОБОТА CRAB**

Рассматривается компьютерное моделирование походки шестиногого шагающего аппарата – инсектоморфного робота CRAB. Робот-краб серии Hexbug представляет собой мехатронную систему, состоящую из корпуса, конечностей и передаточного механизма, который приводит в движение конечности робота. Число конечностей у робота-краба равно восьми, однако две средние ноги с каждой стороны жестко соединены друг с другом, так что фактическое число ног уменьшается до шести (как у насекомых).

Проводящиеся в последние десятилетия исследования, связанные с конструированием инсектоморфных шагающих роботов, имеют своей целью создание перспективных транспортных средств, обладающих повышенной проходимостью; при этом потребности в создании и исследовании новых мехатронных систем стимулируют дальнейшее развитие производительных сил и расширение спектра товаров и услуг, доступных массовому потребителю [1, 2].

В работе проведен кинематический анализ инсектоморфного робота: получены явные выражения для координат и скоростей центров шарниров и центров масс звеньев, а также для координат и скоростей в сочленениях [3]. Эти выражения использовались при компьютерном моделировании движения робота в горизонтальной плоскости. Компьютерное анимационное моделирование движения данного робота проведено с помощью системы **SolidWorks** [4], что позволило наблюдать процесс движения и оценить кинематические возможности робота.

### **Литература**

1. **Охочимский Д.Е., Голубев Ю.Ф.** Механика и управление движением автоматического аппарата. М.: Наука, 1984.
2. **Голубев Ю.Ф., Погорелов Д.Ю.** Компьютерное моделирование шагающих роботов // *Фундаментальная и прикладная математика*. 1998. Т. 4. № 2.
3. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Изд-во МЭИ, 2000.
4. **SolidWorks 2007/2008.** Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

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

## КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ТИПА СЕЛЕНОХОД

Работа посвящена исследованию кинематики шагающего аппарата по типу робота, разработанного российской командой под руководством Сергея Дзись-Войнаровского [1]. Поскольку рассматривается исследовательский аппарат, который предназначен для участия в программе конкурса Google Lunar X PRIZE [2], то данная работа является вполне актуальной. Рассматривается движение шагающего мобильного робота, автономно перемещающегося в соответствии с заданной программой. Исходя из положения о конкурсе селеноход должен пройти по поверхности Луны не менее 500 м, собрать некоторое количество образцов грунта, а также передать на Землю фото-, и видеоизображения. Такой эксперимент возможно реализовать при наличии у шагающего аппарата видео аппаратуры, заборного устройства (типа манипулятора) и радиопередатчика. Конструкция данного робота представляет собой механическую систему, имеющую 17 степеней свободы [3]. При этом ходовая часть аппарата, правая и левая лыжи обладают 2 степенями свободы, поворотная платформа – 1 степенью, манипулятор – 6, блок видео – 4, панели солнечной батареи – 2, антенна – 2. В рассматриваемой работе проведено компьютерное моделирование движения шагающего аппарата [4], а также его вспомогательного оборудования с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» (УМ). В программе этого комплекса решен ряд прямых и обратных задач кинематики движения робота, в частности, задача о распаковке аппарата, захвате и подъеме тела на его борт, построена анимационная картина перечисленных выше движений робота и его оборудования [5].

### Литература

1. <https://sites.google.com/site/moonandearthforever/osvoenie-luny-v-xxi-veke???history=8&sample=0&ref=0>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B4>
3. **Бутенин Н.В., Луцк Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики: учебник. СПб.: Лань, 2002.
4. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.
5. **Погорелов Д.Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 1997.

*Е.Л. Созинова, студ.; рук. А.В. Корецкий, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОБ ОДНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ДВУХ СЕМИЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ**

Повышение культуры производства и необходимость оградить людей от вредных и, в ряде случаев, опасных для их здоровья каких-либо операций в исключительных экстремальных ситуациях, побуждает разрабатывать многофункциональные установки, готовые полностью заменить человека, поэтому не возникает сомнений в актуальности исследования таких комплексов [1, 2]. В данной работе рассматривается подъем двумя манипуляторами лепешки на заданную высоту, при этом решается прямая задача динамики, т.е. при известных уравнениях движения [3] в соответствующих кинематических сочленениях манипулятора, и по построенным уравнениям динамики для рассматриваемой механической системы, находятся вращающие моменты в этих кинематических парах. Для решения поставленной задачи построены уравнения динамики, исходя из уравнений Лагранжа 2-го рода [4]. Принимая во внимание, что силовая нагрузка для большинства элементов рассматриваемой механической системы относится к потенциальным силам, уравнения Лагранжа выписываются в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, 3, 4),$$

где  $L$  – функция Лагранжа;  $Q_i$  – обобщенные силы от непотенциальных сил (искомые вращающие моменты). Учитывая, что кинематические уравнения в соответствующих сочленениях как у левого, так и правого манипулятора идентичны, а в выполнении данной операции по подъему лепешки задействованы только четыре звена каждого манипулятора, работающие синхронно, то искомые вращающие моменты также будут совпадать. Поэтому строить уравнения динамики достаточно только для одного, например левого, манипулятора.

### **Литература**

1. <http://www.cccindustrial.com/public/data/companyCatalogue1213805528.pdf>
2. <http://www.motoman.com/motomedia/manuals/docs/156402-1CD-R2.pdf>
3. **Созинова Е.В., Корецкий А.В.** Кинематический анализ совместной работы двух семизвенных манипуляторов//Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XX Междунар. НТК студентов и аспирантов (27–28 февраля 2014, Москва): Тезисы докладов. В 4-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 4.
4. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики: учебник. СПб.: Лань, 2002.

А.С. Степанов, студ.; рук-ли В.В. Подалков, д.т.н., проф.;  
Е.С. Сбытова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

## ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ДИНАМИКУ ГИРОСКОПА КАМЕРТОННОГО ТИПА

Микромеханические гироскопы (ММГ) [1] находят широкое применение в системах ориентации, навигации и управления движением объектов различного назначения в качестве датчиков инерциальной информации. Задача увеличения точности этих датчиков является актуальной и на данный момент. Решение этой задачи заключается в повышении технологического качества изготовления, в создании точных математических моделей движения чувствительного элемента.

Объектом исследования является новый ММГ с резонатором в виде упругих стержней [2], конструктивная схема которого представлена на рис. 1.



Рис. 1. Конструктивная схема микромеханического гироскопа с резонатором в виде упругих стержней

В линейной постановке задачи исследовано влияние разночастотности и разнородности на прецессию волновой картины колебаний гироскопа. Получено аналитическое выражение для угла прецессии.

Методом двух масштабов построено решение нелинейных уравнений движения чувствительного элемента микромеханического гироскопа на вибрирующем основании. Проведен анализ стационарных колебаний системы с демпфированием. Исследована устойчивость по Ляпунову стационарных решений и в пространстве параметров системы указаны области устойчивости стационарных режимов колебаний.

Показано, что разночастотность и разнородность, а также геометрическая нелинейность существенным образом влияют на точностные характеристики гироскопа.

### Литература

1. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
2. Степанов А.С., Подалков В.В., Сбытова Е.С. Линейные модели микромеханического гироскопа с резонатором в виде упругих стержней // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тр. XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 4.

К.И. Тимченко, студ.; рук. А.В. Корецкий, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ О ВЫСТАВКЕ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ МАРСОХОДА МИССИИ «ЭКЗОМАРС» В РАБОЧЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ

В соответствии с программой миссии «Экзомарс» [1] на робот возлагается задача бурения скважины глубиной в 2 м. Такой эксперимент планируется провести впервые в истории изучения Красной планеты с целью выявления возможных следов биологической жизни на Марсе. Поскольку рассматривается ровер нового поколения, который планируется доставить на поверхность планеты Марс в 2018 году, то не возникает никаких сомнений, что исследование динамики марсохода является вполне актуальным. В данной работе рассматривается трехзвенный манипулятор, рабочим звеном которого является именно буровая установка. Из походного положения манипулятор выставляет буровую установку в рабочее положение. В [2] было получено решение обратной задачи кинематики о выставке буровой установки в рабочее положение. Это дает возможность решить прямую задачу динамики, т.е. определить при известных законах изменения углов в кинематических сочленениях рассматриваемого трехзвенного манипулятора, вращающие моменты, обеспечивающие заданное движение буровой установки. Для решения поставленной задачи построены уравнения динамики манипулятора в форме уравнений Лагранжа 2-го рода [3]. Принимая во внимание, что силовая нагрузка для большинства элементов рассматриваемой механической системы относится к потенциальным силам, уравнения Лагранжа выписываются в виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, 3),$$

где  $L$  – функция Лагранжа;  $Q_i$  – обобщенные силы от непотенциальных сил (искомые вращающие моменты).

### Литература

1. <http://www.link2universe.net/2012-11-22/exomars-ok-alla-collaborazione-tra-esa-e-roscomos-per-il-nuovo-rover-marziano-europeo/>
2. **Тимченко К.В., Корецкий А.В.** Кинематический анализ марсохода миссии «ЭКЗОМАРС» // Радиотехника, электротехника и энергетика: XX Междунар. НТК студентов и аспирантов (27–28 февраля 2014, Москва): Тезисы докладов. В 4-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 4.
3. **Бутенин Н.В., Луиц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики: учебник. СПб.: Лань, 2002.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРА

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются высокоэффективными и перспективными средствами для решения военных и гражданских задач, таких как патрулирование территории, аэрофотосъемка и аэровидеосъемка объектов, помощь в поисково-спасательных работах. Квадрокоптер, в силу его мобильности и миниатюрности, можно использовать и внутри помещений и на местности со сложным рельефом, в зонах, доступ к которым затруднен для аэрофотосъемки, видеосъемки, патрулирования, доставки мелких грузов и др.

В процессе выполнения данной работы исходя из требуемых характеристик были подобраны комплектующие и собран беспилотный летательный аппарат – квадрокоптер.

Рассмотрены вопросы получения и анализа данных с микромеханических датчиков инерциальной навигации и ориентации (трехосного гироскопа и акселерометра) с использованием вычислительной платформы *Arduino* [1]. Проведены анализ и обработка зашумленных измерений приборов, в том числе калибровка их аддитивных погрешностей. Установлено, что указанные погрешности можно рассмотреть как стационарные широкополосные белые шумы [2], а смещения нуля датчиков могут изменяться от запуска к запуску. Реализованы некоторые алгоритмы фильтрации измерительной информации от шумов [3].

Разработана кинематическая модель движения аппарата [4]. Решена задача восстановления пространственной ориентации квадрокоптера по полетной телеметрии.

Полученные при выполнении работы результаты можно использовать при разработке системы управления и стабилизации движения летательного аппарата.

### Литература

1. <http://arduino.cc/>
2. **Астапов Ю.М., Медведев В.С.** Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1982.
3. **Бобцов А.А.** Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 2002. Т. 35. № 11.
4. **Губаренко С.И.** Механика инерциальных навигационных систем. М.: Издательство МЭИ, 1993.

**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*

*К.С. Аверьянова, студ.; рук. Р.Ф. Идиатулин, к.т.н., инж.  
(СамГТУ, г. Самара)*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ**

Практически во всех сечениях ЕЭС России перетоки активной мощности  $P(t)$  близки к максимально допустимым значениям или достигают их и носят реверсивный вид [1]. Наличие неравномерности размещения электростанций по отношению к расположению потребителей вызывает необходимость развития межсистемных связей для обменов электроэнергией [1, 2]. Достоверная оценка расчетных значений перетоков  $P(t)$  по ЛЭП из условий допустимого нагрева оборудования, износа изоляции, ограниченный перетоков  $P(t)$  в сечениях, а также расчетных потерь электроэнергии от перетоков предполагает существование данных не только о закономерностях распределения случайных значений перетоков  $P(t)$ , но и о связи между ординатами процесса ее изменения. Последнее осуществимо только при исследовании перетоков  $P(t)$  по ЛЭП как случайного процесса.

Объект исследования – графики реверсивных перетоков  $P(t)$  ВЛ 500 кВ межсистемных связей в ОЭС Средней Волги. Регистрация графиков проводилась за сутки –  $T_{сут} = 24$  ч с интервалом дискретизации  $\Delta t = 1$  мин. Для каждой ВЛ 500 кВ число записанных реализаций графиков за один год составляло двадцать: по пять в январе, апреле, июле и октябре. По графикам построены гистограммы распределения вероятностей  $\theta$ -ординат перетоков  $P(t)$ , которые аппроксимировались кривой «усеченного» нормального закона распределения с коэффициентами усечения  $C_{ус}$  от 1,02 до 1,12 [2]. Проверка, проведенная по критерию К. Пирсона  $\chi^2$ , подтвердила, что с доверительной вероятностью  $0,3 \div 0,6$  экспериментальные законы распределения сходятся к «усеченному» нормальному закону распределения [2]. Установлено, что экспериментальные нормированные корреляционные функции (НКФ) графиков перетоков  $P(t)$ , исследованных ВЛ 500 кВ, опи-

сываются экспоненциальной НКФ. Таким образом, результаты исследований позволяют существенно снизить погрешности оценки расчетных значений перетоков  $P(t)$  и потерь электроэнергии по линиям электропередачи.

### **Литература**

1. **Электроэнергетика** России 2030: Целевое видение / под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008.
2. **Идиатулин Р.Ф., Степанов В.П., Кротков Е.А.** Расчет электрической нагрузки крупных энергоузлов, влияющих на электроэнергетический режим энергосистем // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ТРАНСПОЗИЦИИ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Одним из основных источников постоянной несимметрии токов и напряжений в электрической системе (ЭС) является пофазное различие электрических параметров трехфазных линий. Наиболее эффективным, простым по осуществлению, экономичным и надежным способом снижения несимметрии токов и напряжений промышленной частоты в ЭС является транспозиция фаз линий.

Известные методики расчета несимметрии для определения целесообразности выполнения транспозиции линий используют аналитические соотношения с большим количеством расчетных и эмпирических коэффициентов, что значительно затрудняет их применение на практике.

Данная работа посвящена разработке алгоритма для расчета функционирования ЭС, реализованного на базе среды MatLab Simulink [1].

На первом этапе исследования была построена имитационная и функциональная модель сложной электроэнергетической системы (рис. 1) с помощью программного пакета SimPowerSystem.

На основе этой модели проводился расчет трехпроводной транспонированной и нетранспонированной линии электропередач (ЛЭП). По найденным результатам токов и напряжений были оценены коэффициенты несимметрии. Полученные параметры сравнивались с результатами, найденными с помощью матричных методик проектирования [2] и показали более точный результат.

Использование модели ЭС позволяет уточнить существующую методику расчета транспозиции ЛЭП.

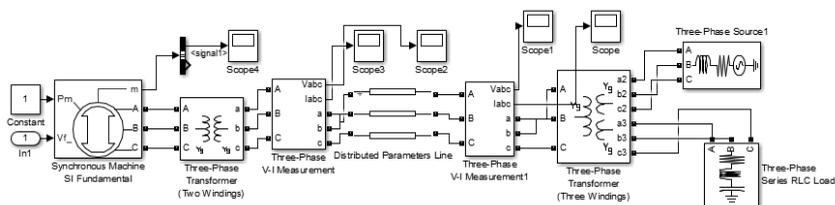


Рис. 1. Схема моделирования ЛЭП с распределенными параметрами

### Литература

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPowerSystem и Simulink. М.: ДКМ Пресс, 2007.
2. Красильникова Т.Г. Транспозиция электропередачи и ее неожиданный эффект // Электричество. 2006. № 1.

*Р.А. Баебитов, студ.; рук. Д.В. Саленик, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПИТАЮЩИХ СЕТЕЙ**

Основной задачей проектирования электрических сетей является экономически обоснованный выбор рационального варианта схемы сети. При сравнении вариантов схем проектировщику приходится выполнять множество расчетов установившихся режимов сети. С увеличением количества узлов нагрузки сеть усложняется, растет число возможных вариантов сети, актуальной становится задача формализации однотипных расчетов режимов с целью снижения затрат времени, необходимых на выполнение работы в целом. Одним из путей достижения этих целей является использование матричных методов.

На основании существующих матричных методов расчета установившихся режимов сетей с использованием обобщенных параметров схем сети [1] был разработан и применен алгоритм определения потоков мощности в ветвях схем сети, потерь напряжения и потерь мощности.

В качестве проектируемой сети рассматривалась районная сеть 220–110 кВ с одним источником питания и шестью узлами нагрузок. Для каждого варианта сети составлялись натуральные матрицы схем сети. В ходе расчета методом коэффициентов распределения определялись значения передаваемой активной и реактивной мощностей в ветвях схем. После выбора сечения проводов ВЛ проводилась проверка технической осуществимости вариантов схемы сети по условию непревышения суммарных потерь напряжения с использованием метода матрицы узловых сопротивлений. После определения состава основного оборудования осуществлялась оценка потерь активной мощности для каждого варианта с использованием матрицы узловых сопротивлений. Для окончательно выбранного варианта расчет нормальных и послеаварийных установившихся режимов проводился методом матрицы узловых сопротивлений, расчеты проводились в несколько итераций. Все расчеты выполнялись в программном комплексе MATLAB, результаты расчета совпали с расчетами в RastrWin.

Рассмотренные методы могут быть рекомендованы как основные в практике подготовки бакалавров со специализацией «Электроэнергетические системы и сети», что позволит бакалаврам получить навыки расчета режимов сложных сетей, повысить точность расчетов и сократить затраты времени, требуемые на выполнение выпускных работ бакалавра.

### **Литература**

1. **Мельников Н.А.** Матричный метод анализа электрических цепей. –2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1972.

*А.А. Губарев, студ.; Я.В. Макаров, асп.; В.Е. Верещагин, инж.;  
рук. В.М. Дашков, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

## **УЧЕТ МЕТЕОУСЛОВИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Эффективность работы производственных отделений МРСК характеризуется многими показателями, в том числе величиной потерь электроэнергии (ПЭ). Для разработки эффективных мероприятий по снижению потерь электроэнергии  $\Delta W$  необходимо иметь достоверные данные об их величине и структуре. К настоящему времени известно несколько методов расчета и анализа ПЭ в электрических сетях различного назначения. В литературе отмечается, что весьма эффективным в решении указанной задачи может оказаться применение вероятностно-статистических моделей.

В самом общем виде ПЭ в электрических сетях производственных отделений, районов электрических сетей и т.п. могут быть выражены зависимостью

$$\Delta W = f(\Phi_{\text{тр}}, \Phi_u, \Phi_{\text{ч}}, \Phi_l, \Phi_T, \Phi_v, \Phi_{\text{ос}}, \dots, \Phi_n), \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{тр}}, \Phi_u, \Phi_{\text{ч}}, \Phi_l, \Phi_T, \Phi_v, \Phi_{\text{ос}}$  – соответственно функции, учитывающие влияние на величину потерь установленной мощности трансформаторов, напряжения линий электропередачи, частоты в электроэнергетической системе, длины линий электропередачи, температуры воздуха, скорости ветра, суммарного количества осадков и т. д.

Из (1) видно, что величина ПЭ зависит от многочисленных факторов и является сложной функцией параметров элементов электроэнергетических сетей (силовые трансформаторы, кабельные и воздушные линии электропередачи), параметров режима работы сетей, метеорологических условий.

Основная цель работы на данном этапе состояла в том, чтобы общую величину потерь электроэнергии разделить на две основные составляющие, обусловленные объективными и субъективными факторами. К объективным факторам, влияющим на величину и структуру ПЭ, относятся метеорологические условия и в некоторой степени параметры элементов электрической сети. К субъективным факторам – параметры режимов работы сетей (величина напряжения, частота тока), параметры элементов сети.

На данном этапе собраны данные о температуре, скорости ветра и давлении для трех характерных районов Самарской области. С учетом указанных факторов определяются температуры проводов ВЛ и соответствующие им сопротивления проводников, что позволит в дальнейшем выявить долю потерь электроэнергии в ВЛ, обусловленную изменением указанных факторов.

*А.А. Гусарова, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ВЛИЯНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Во многих отечественных энергосистемах наибольшая доля нарушений стандартов по качеству электроэнергии связана с недопустимыми отклонениями напряжения от номинального значения, несимметрией и значительным содержанием высших гармонических составляющих напряжения. Нарушение стандартов качества электроэнергии приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей и повышенному износу оборудования как в сетевых компаниях, так и у потребителей. Для предотвращения подобных явлений многие российские энергокомпании активно работают над созданием систем контроля и управления качеством электроэнергии.

Исследование чувствительности узлов является одним из направлений структурного анализа электроэнергетических систем, использующего оценку реакций напряжений узлов на изменение нагрузок в них. Установка стационарных систем контроля и управления качеством электроэнергии может быть целесообразна в узлах с наибольшей чувствительностью [1].

Сенсорные узлы являются наиболее показательными по отклонению напряжения, несимметрии и несинусоидальности [2]. Изменение нагрузки на единицу в этих узлах вызывает сильное изменение напряжения. Вместе с тем в чувствительных узлах наблюдаются наивысшие амплитуды гармоник [1]. Именно в них целесообразнее всего устанавливать средства, способствующие повышению качества электроэнергии (фильтрокомпенсирующие устройства, ИРМ и т.д.). Воздействие будет осуществляться на узлы высших классов напряжения (330–110 кВ).

Интерес представляет выявление узлов, комплексное воздействие в которых будет наиболее эффективным для улучшения качества электроэнергии не только в них, но и в их ближайшем окружении.

### **Литература**

1. **Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш.** Определение чувствительных узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармониках // *Электричество*. 2013. № 8.
2. **Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш.** Способ нормализации уровней напряжения в ЭЭС // *Труды 8-го Междунар. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии*, 16–19 июня 2009 г.

*О.С. Добкин, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТАМ**

Автоматизация управления технологическими процессами на объектах электроэнергетики является одним из важнейших условий повышения эффективности работы электрических сетей. Внедрение автоматизированных систем управления позволяет снизить нагрузку на диспетчера и повысить надежность управления энергосистемой [1].

В современной электроэнергетике критически важным становится вопрос обеспечения безопасности АСУ, так как несанкционированное вмешательство в систему управления может привести к серьезным последствиям. Актуальной задачей является оценка рисков некорректной работы систем диспетчерского и технологического управления и оценка возможного ущерба [2].

В рамках данной работы проведены оценка и анализ рисков для автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ). В соответствии с методологией оценки рисков были определены структура возможного ущерба, возможности и последствия реализации угроз. В части определения структуры возможного ущерба использовались выборки статистических данных. Возможность реализации рисков рассмотрена применительно к АСДУ с учетом технологических процессов и структуры системы. Прогнозирование последствий проведено с помощью таких методов, как ФТА (Анализ дерева неисправностей, стандарт МЭК 61025) и ЕТА (Анализ дерева событий) для математической модели реального объекта. В работе проведена итоговая верхнеуровневая оценка рисков с помощью математических моделей, основанных на нечеткой логике и теории нечетких множеств с использованием программного обеспечения MatLab (с использованием расширения Fuzzy Logic Toolbox).

Полученные в исследовании результаты могут быть использованы для дальнейшей проработки данного вопроса и управления выявленными рисками в целях повышения надежности оперативно-диспетчерского управления.

### **Литература**

1. **Разработка** системы передачи информации о состоянии энергетических объектов с использованием оперативного журнала энергообъекта / А.Ю. Бадалов, Д.Б. Гвоздев, В.Л. Пельмский // Электрические станции. 2013. № 8.
2. **Лесных А.В., Лесных В.В.** Оценка ущерба и регулирование ответственности за перерывы в электроснабжении: зарубежный опыт // Проблемы анализа риска 2005. Том 2. № 1.

*В.Р. Дубонос, асп.; рук. Н.И. Зеленохат, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **СГЛАЖИВАНИЕ РАЗМАХА КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕТОКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА STATCOM**

В ЕЭС России проектируются, а также уже действуют межсистемные связи, на которых после внезапных возмущений происходят длительные слабозатухающие низкочастотные колебания передаваемой активной мощности. Такие явления наблюдаются в восточной части ОЭС Сибири, на межсистемном транзите от Санкт-Петербурга через Карелию до Мурманска (Кольско-Карельский транзит) и в других частях ЕЭС. Применяемые алгоритмы управления на АРВ синхронных генераторов обеспечивают синхронную работу внутри подсистем, но почти не влияют на перетоки мощности по межсистемным связям [1]. В настоящее время в России и за рубежом ведутся исследования по созданию устройств управления перетоками мощности по межсистемным связям с использованием векторного измерения параметров режима по концам линии электропередачи в связке с устройствами FACTS. Однако пока не показано решение, удовлетворяющее электроэнергетиков.

В данной работе для сглаживания колебаний мощности по межсистемным связям предлагается применять STATCOM, выполняющий функции «демпфирования» колебаний, если осуществлять управление по специально разработанному алгоритму.

Излагается новый подход к формированию алгоритмов управления перетоками мощности с помощью STATCOM, при котором используются параметры режима, измеряемые непосредственно в месте установки управляющего устройства. В этом случае повышается быстродействие и качество сглаживания колебаний перетока мощности по связи, а также надежность работы в сравнении с применением алгоритмов управления, в которых используются векторные измерения параметров режима по концам связи.

Проведенные исследования с расчетами подтверждают эффективность предложенного решения. Предлагаемое мероприятие может найти применение на межсистемных связях в ЕЭС России и за рубежом.

### **Литература**

1. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.

*А.М. Зимин, студ.; рук. Н.И. Зеленохат, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕТОКОМ МОЩНОСТИ ПО ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УПРАВЛЯЕМЫМ ШУНТИРУЮЩИМ РЕАКТОРОМ**

Электропередача, в частности межсистемная связь, которая может включать в себя линии электропередачи (ЛЭП) разных классов напряжения, получила название неоднородной связи. Такие связи находят применение для передачи электроэнергии в ЕЭС России. Возникает необходимость в управлении перетоком мощности по ЛЭП таких связей для увеличения их пропускной способности и снижения потерь мощности. В России и за рубежом ведутся работы по разработке и применению устройств управления перетоками мощности по межсистемным связям, известные под названием FACTS (Flexible AC Transmission System) [1]. Однако при небольших востребованных диапазонах изменения перетока мощности по связи можно использовать и управляемый шунтирующий реактор (УШР), устанавливаемый на промежуточной подстанции ЛЭП низшего класса напряжения.

Проведены исследования в направлении выявления эффективности и определения алгоритмов управления УШР в неоднородной связи, на основе которых применительно к простой схеме неоднородной связи получены результаты, подтверждающие возможность применения УШР для управления перетоком мощности по связи.

Обоснованно сформирован алгоритм управления перетоком мощности, для реализации которого требуется измерение угла сдвига фаз векторов напряжения по концам ЛЭП [2]. Для этого можно использовать измерительные устройства типа PMU (Phasor Measurement Unit) или отечественные типа МИП (многофункциональный измерительный преобразователь).

Выполнены расчеты для схемы электропередачи с конкретными параметрами, которые подтвердили в частных случаях целесообразность рассматривать при проектировании применение устройств УШР в неоднородных связях.

### **Литература**

1. **Зеленохат Н.И.** Интеллектуализация ЕЭС России: инновационные предложения: практич. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Зеленохат Н.И.** Анализ режимных характеристик межсистемной связи со статическими компенсаторами // *Электричество*. 1997. № 3.

*И.В. Зубко, студ.; рук. Н.И. Зеленохат, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **КОМБИНИРОВАННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ**

С развитием малой энергетики в электроэнергетических системах находят применение электростанции на реках с небольшими напорами воды, дизельные, ветряные установки малой мощности и другие традиционные и нетрадиционные источники электрической энергии, которые выдают мощность в электроэнергетическую систему не стабильно в зависимости от разного рода факторов, связанных с режимом работы этих объектов [1]. Они имеют малые моменты инерции на валу энергоагрегатов и при больших возмущениях могут выходить из синхронизма, вследствие чего их отключают от энергосистемы, что недопустимо, ввиду того, что при недостатке резерва генерирующих мощностей возможны отключения потребителей, а в условиях рыночных отношений это приведет к наложению больших штрафов для электросбытовых компаний.

Одним из мероприятий, повышающих динамическую устойчивость таких установок, является электрическое торможение. Предлагается комбинированное электрических торможений, включающее в себя основу продольного и поперечного (в виде нагрузки) электрических торможений. Благодаря такой комбинации становится возможным при сбросе мощности генератором во время короткого замыкания (КЗ) введением в работу продольного электрического торможения уменьшать энергию ускорения ротора, а введением в работу поперечного электрического торможения после отключения КЗ увеличивать энергию торможения, обеспечивая тем самым сохранение динамической устойчивости электростанции [2].

Выполнены расчеты для конкретной схемы электроэнергетической системы с удаленной электростанцией от шин бесконечной мощности при КЗ с применением комбинированного электрического торможения. Расчеты подтверждают эффективность комбинированного электрического торможения для сохранения динамической устойчивости при сильных возмущениях и сохранения агрегата малой мощности в синхронизме с электроэнергетической системой.

### **Литература**

1. **Зеленохат Н.И., Нгуен Х., Севостьянов А.О.** Дискретное управление электрическим торможением синхронного генератора в электроэнергетической системе // Вестник МЭИ. 2009. № 2.
2. **Зеленохат Н.И.** Повышение динамической устойчивости энергосистемы с помощью электрического торможения генераторов // Электро. 2004. № 4.

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Ветровая энергетика является одним из наиболее динамично развивающихся видов энергетики на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Увеличение доли ВЭС в общем объеме производства электроэнергии создает целый ряд системных проблем. Эти проблемы связаны с влиянием колебаний графиков генерации ВЭС на режимы работы энергосистем (ЭЭС) особенно при низких уровнях нагрузки, а также нехватке средств для точного метеопрогнозирования.

На основе результатов анализа современного состояния и перспектив развития мировой ветроэнергетики обоснована эффективность ее применения для обеспечения возрастающих потребностей в энергии и решения проблем охраны окружающей среды [1].

Обоснована актуальность и перспективность более масштабного использования ВЭС в России с учетом существующей структуры производства электроэнергии и социально-экономической ситуации в государстве. Отмечены основные направления развития ветровой энергетики в России.

Проведен сравнительный анализ схем систем генерирования электроэнергии (СГЭЭ) современных ВЭУ и выделены факторы, которые следует учитывать при выборе ветроэлектрической установки (ВЭУ) и разработке схем выдачи мощности ВЭС.

Проведены систематизация и анализ общесистемных проблем, связанных с увеличением доли ВЭС в структуре генерирующих мощностей системы, а также требований к техническому присоединению ВЭУ/ВЭС к сети ЭЭС в странах с высокой долей ВЭС. Выделены основные аспекты, которые необходимо учитывать при разработке новых методов планирования режимов ЭЭС при увеличении в ней доли ВЭС [2].

На основе проведенного сравнительного анализа существующих математических моделей ВЭУ с СГЭЭ на базе асинхронного синхронизированного генератора для моделирования режимов, при которых возникает провал напряжения, проводится расчет динамической устойчивости работы ВЭУ. При этом была выбрана математическая модель, которая позволяет получить результаты, близкие к результатам технических испытаний ВЭУ.

### **Литература**

1. **Перспективы** мировой ветроэнергетики. GWEC, 2009.
2. **Erich Nau**, Wind Turbines. Germany, 2005.

*Е.А. Коннов, студ.; рук. Н.И. Зеленохат, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **МНОГОКРАТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С УДАЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ**

Электрическое торможение генераторов удаленных электростанций находит применение в тех случаях, когда располагаемыми средствами обеспечить сохранение генераторов в синхронизме при больших возмущениях становится невозможным и приходится отключать часть генераторов на таких электростанциях. Наибольшие затруднения возникают при формировании алгоритма управления электрическим торможением [1], поэтому электрическое торможение применяется редко (в России, например, применяется на Зейской ГЭС).

Основное назначение однократного электрического торможения – это обеспечение сохранения динамической устойчивости в первом цикле выбега роторов генераторов на электростанции. Проведенные исследования показывают, что можно эффективно применять многократное торможение для демпфирования качений роторов генераторов в послеаварийном режиме и тем самым устранять колебания напряжения в узлах нагрузки в электрической сети [2].

Разработан алгоритм управления многократным электрическим торможением на основе энергетического подхода, выполнены расчеты с применением цифрового моделирования.

Для реализации алгоритма требуется передача векторов напряжения по концам линии электропередачи, связывающей электростанцию с устройством электрического торможения с шинами приемной части энергосистемы.

Разработан также алгоритм, в котором используются параметры режима, измеряемые непосредственно на рассматриваемой электростанции с устройством электрического торможения.

Дано сравнение с однократным электрическим торможением, сделано заключение о целесообразности применения многократного электрического торможения с разработанным алгоритмом управления при проектировании мероприятий по сохранению динамической устойчивости вновь сооружаемых удаленных электростанций.

### **Литература**

1. **Дискретное** управление электрическим торможением синхронного генератора в электроэнергетической системе / Н.И. Зеленохат и др. // Вестник МЭИ. 2009. № 2.
2. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.

## **ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Задача снижения потерь электроэнергии в последние годы из технической категории превратилась в социальную [1], так как стоимость потерь является одной из составляющих постоянно растущего тарифа на электроэнергию. Одним из технических мероприятий по снижению потерь является оптимизация режимов работы электрических сетей.

Использование методов оптимизации позволяет вырабатывать оптимальные управляющие воздействия на систему [2], однако в силу сложности электрических сетей, большого количества регулирующих устройств и технологических параметров необходимы алгоритмизация и автоматизация деятельности диспетчера. Для повышения эффективности действий диспетчера и, как следствие, надежности управления режимом электрической сети существуют два основных пути: увеличение объема передаваемой с объекта телеинформации и использование функций телеуправления [3].

Появление значительного потенциала регулирования напряжения помимо сетевых компаний у потребителей энергии, противоречивость их интересов вызывают необходимость в разработке новых концепций, методов и технических средств регулирования напряжения в электрической сети.

Перспективным направлением решения данной задачи является децентрализованное регулирование напряжения с помощью интеллектуальных регуляторов [4].

В процессе работы разработан алгоритм децентрализованного управления, позволивший снизить потери электроэнергии в сравнении с классическим способом регулирования.

### **Литература**

1. **Воротницкий В.Э.** Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006.
2. **Крумм Л.А.** Методы приведенного градиента при управлении энергетическими системами. М.: Наука, 1977.
3. **Гвоздев Д.Б., Шведин Б.Я.** Разработка системы передачи информации о состоянии энергетических объектов // Электрические станции. 2013. № 8.
4. **Тарасов В.Б.** Многоагентные системы. М.: Эдиториал УРСС, 2002.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСОБЫХ УЗЛОВ НА СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ

Задача оптимизации режима электрической сети состоит в определении установившегося режима электрической сети, при котором были бы поддержаны технические ограничения и были бы минимальными потери активной мощности в сети. Критерий оптимизации называют целевой функцией. Нельзя вводить большое количество ограничений на целевую функцию, так как это значительно усложняет задачу оптимизации. Обычно проводят оптимизацию по затратам на производство и передачу электроэнергии [1].

Исследование влияния особых узлов на снижение потерь активной мощности в сети будет проводиться на модели неоднородной системы. Влияние неоднородности ЭЭС выражается в неодинаковой чувствительности параметров установившихся и переходных режимов к возмущениям. Степень неоднородности сети можно оценить, используя понятие жесткости узлов и их сенсорности. Жестким считается узел, при изменении нагрузки которого на единицу напряжения параметр изменяется меньше всего. Элементы схемы сети, параметры режима которых в большей степени изменяются при случайных изменениях в топологии схемы сети и нагрузок, были названы сенсорными [2].

В неоднородных системах необходимо анализировать то, какие узлы являются сенсорными, а какие – жесткими. При проектировании и в эксплуатации необходимо снижать потери активной мощности и энергии для получения более экономичного электроснабжения потребителей или распределения мощности в сетевой компании. Выбор особых узлов может проводиться по значениям  $\Delta V$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta Y$ . Если необходимо только снижение потерь активной мощности в сети, то изменять реактивную мощность лучше в жестких узлах. Если необходима также корректировка уровня напряжения в сети, то изменение реактивной мощности лучше проводить в сенсорных узлах. Используя свойства жесткости и сенсорности узлов, можно выбрать наиболее экономичную по потерям активной мощности и энергии в сети схему.

### Литература

1. **Шульженко С.В.** Методы математической оптимизации. М.: Издательство МЭИ, 2013.
2. **Анализ** неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999.

*А.П. Макаров, Е.О. Тихомиров, М.А. Востров, студенты;  
рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ MATHCAD**

В диспетчерских службах электроэнергетических систем (ЭЭС) при выборе управляющих воздействий противоаварийной автоматики (ПАА) особую актуальность имеют вопросы исследования области статической апериодической устойчивости. Задачи расчета параметров предельных по устойчивости режимов ЭЭС и построения границ области устойчивости (ОУ) требуют применения новых моделей и алгоритмов [1].

Цель данного исследования состоит в совершенствовании численных методов решения уравнений предельных режимов (УПР) и разработке в среде MathCAD компьютерной модели, которая позволяет проводить расчеты и анализ параметров области устойчивости ЭЭС [2].

Авторами в среде MathCAD была разработана учебная компьютерная модель расчета установившихся и предельных режимов ЭЭС. С помощью этой модели был проведен ряд вычислительных экспериментов построения границ ОУ (на примере консервативной тестовой трехузловой схемы ЭЭС). Проведены расчеты уравнений предельных режимов на основании уточнения начальных приближений для собственного вектора и вычислений оптимальной длины шага метода Ньютона на каждой итерации [3], а также получены результаты решения УПР с применением процедуры Энеева – Матвеева.

Результаты расчетов области устойчивости ЭЭС доказали, что для улучшения сходимости итерационных процессов решения УПР целесообразно применение модификации классического метода Ньютона, основанной на ограничении длины шага.

Разработанные авторами компьютерная модель и алгоритмы используются в учебном процессе СамГТУ при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» и «Устойчивость электроэнергетических систем».

### **Литература**

1. **Андерсон П., Фуад А.** Управление энергосистемами и устойчивость: пер. с англ. / под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980.
2. **Крюков А.В.** Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИрГУПС. 2012.
3. **Крюков А.В., Сенько В.В.** Расчеты предельных режимов электроэнергетических систем для целей оперативного управления // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3.

*Я.В. Макаров, асп.; рук. Ю.П. Кубарьков, д.т.н., проф.  
(СамГТУ, г. Самара)*

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕТИ ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ**

В настоящее время остро стоит задача эксплуатации сети с ограниченной пропускной способностью линий электропередач и доступной мощностью. А с учетом фактора неопределенности генерации источников, эта задача дополнительно усложняется.

Решение поставленной задачи может быть получено с применением мультиагентной системы (МАС). В основании МАС лежит принцип взаимодействия множества агентов, каждый из которых представляет свой собственный элемент сети, содержит набор его параметров и отвечает за их контроль (линия, нагрузка, источник и т.д.) [1].

Условия применения МАС определяют радиальную структуру электрической сети. Однако такие ограничения предусматривают и пути резервирования – подключение альтернативного источника питания.

Определение конфигурации сети заключается в выборе соответствующего источника питания для конкретного потребителя, включая или отключая соответствующие линии электропередачи. Таким образом, множество позиций выключателей определяют конфигурацию сети.

Поиск решения агентами осуществляется начиная от источников путем последовательного перебора возможных вариантов подключения нагрузок. При этом происходит постоянный перерасчет и уточнение уровней напряжения для различных вариантов схем.

Для кольцевой схемы с двумя источниками эти процессы происходят, пока некоторый агент не получит запрос с двух сторон, после чего агент сравнит расчетные параметры по двум возможным вариантам и примет решение о том, какой выключатель должен быть включен/отключен.

Таким образом, определяется оптимальная конфигурация радиальной сети для соответствующих потребителей. Однако при любом изменении этих параметров агентами проводится перерасчет режима и при необходимости изменение положения выключателей.

Полученные в ходе работы результаты подтверждают корректность предлагаемого алгоритма и возможность работы МАС в реальных сетях.

### **Литература**

1. **Анализ** и восстановление режимов работы систем электроснабжения с помощью мультиагентной системы / Ю.П. Кубарьков, А.Ю. Рыгалов, Я.В. Макаров, А.С. Карпов // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. № 4(17).

*К.А. Наумов, студ.; рук. М.А. Поляков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ И УСТОЙЧИВОСТИ УПРАВЛЯЕМОЙ ЭЭС. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА**

Целью исследования является выявление технической эффективности применения асинхронизированного синхронного компенсатора (далее по тексту – АСК) для увеличения пропускной способности ЛЭП [1].

Для этого необходимо проанализировать возможность использования АСК на шинах промежуточной ПС для обеспечения режимов электропередач, статистической аperiodической и динамической устойчивости при изменении длины головного участка.

АСК имеет некоторые отличительные особенности, учет которых представляется особым интересом для практического применения.

АСК обладает повышенным диапазоном потребляемой реактивной мощности, по сравнению с СК. В динамических режимах преимуществом АСК является возможность кратковременной двукратной (по отношению к номинальной мощности) выдачи/потребления реактивной мощности в электрическую сеть [2, 3].

Современные исследования влияния АСК на регулирование реактивной мощности в электроэнергетической системе, повышения ее пропускной способности при управлении режимом работы АСК с помощью соответствующей системы управления не дают достаточно полного ответа на вопрос о возможностях АСК и нуждаются в дальнейшей проработке.

Для выявления возможности использования АСК определенной мощности был проведен расчет на основе тестовой схемы дальней электропередачи с изменяющейся в заданном диапазоне длиной головного участка. В результате исследования были выявлены оптимальные параметры сети для использования АСК в ЭЭС.

### **Литература**

1. **Зеленохат Н.И.** Интеллектуализация ЭЭС России: Инновационные предложения. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус пресс, 2011.
3. **Строев В.А.** Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях. М.: Высшая школа, 1999.

*В.А. Невская, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕНСОРНЫХ И ЖЕСТКИХ УЗЛОВ НА ЗАПАСЫ ПО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

Аварии, возникающие по причине нарушения устойчивости в крупных ЭЭС, влекут за собой расстройство электроснабжения больших районов и городов, функционирования промышленности и быта населения. Ликвидация последствий таких аварий и восстановление необходимых условий работы ЭЭС достаточно сложны и требуют больших затрат [1]. Поэтому вопрос увеличения запасов по статической устойчивости при проектировании электрических сетей и их эксплуатации не теряет актуальности.

Сети современных ЭЭС характеризуются весьма сложной структурой и конфигурацией, разнообразием параметров, что приводит к возникновению неоднородности схем. Особый интерес представляет исследование влияния неоднородности схем на запасы по статической устойчивости. Таким образом, моделью для исследования влияния особых узлов на запасы по статической устойчивости будет неоднородная система. Степень неоднородности можно оценить, используя понятия жесткости и сенсорности узлов. Жестким считается узел, на шинах которого при изменении нагрузки на единицу напряжение изменяется меньше всего. Узел с противоположными свойствами считается сенсорным [2].

Оценить жесткость отдельных узлов можно, используя для каждого узла схемы значения разности собственных и суммы взаимных проводимостей из матрицы узловых проводимостей. Необходимо утяжелять режим, нагружая отдельно сенсорные и жесткие узлы. Результаты утяжеления можно использовать для получения определенных выводов для данной системы. До расчета режима можно сделать прогноз о том, что самый высокий запас по статической устойчивости будет получен при утяжелении в жестком узле, так как напряжение в нем меняется минимально. Наименьшее значение запаса при утяжелении в сенсорном узле объясняется наибольшим изменением напряжения в этом узле.

Таким образом, наличие информации о том, какие узлы ЭЭС сильнее всего реагируют на внешние возмущения, позволяет определить, какие элементы схемы ЭЭС являются слабыми местами. Это дает возможность улучшать свойства ЭЭС при ее развитии, повышать величины запаса по статической устойчивости, т.е. снижать риск возникновения аварий по причине нарушения статической устойчивости.

### **Литература**

1. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979.
2. **Савоськин Н.Е.** Надежность электрических систем. Пенза: Изд-во ПГУ, 2004.

*А.А. Парамонов, студ.; рук. О.Н. Кузнецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

На данный момент исследование электромеханических переходных процессов и режимов работы электроэнергетических систем осуществляется различными методами моделирования. Математическое моделирование не всегда позволяет в полной мере учесть все особенности исследуемых процессов, что нередко приводит к получению недостоверных результатов. Физическое моделирование лишено данной проблемы, однако обладает рядом недостатков, сопряженных с необходимостью установки и обслуживания специализированного дорогостоящего оборудования, проектируемого на заказ. Возникает необходимость разработки комплексного подхода, позволяющего объединить достоинства физических и математических моделей.

На сегодняшний день был разработан прототип программно-аппаратного комплекса на базе микроконтроллеров, представляющий собой гибридную модель генератора электростанции. Цифровая составляющая модели представлена системой дифференциальных уравнений, моделирующих механическое движение ротора и действие системы АРВ генератора. С помощью модуля ЦАП осуществляется преобразование цифрового значения напряжения на зажимах генератора в аналоговый сигнал. Благодаря быстрдействию такого комплекса, возможно осуществлять моделирование в темпе процесса [1].

Полученная гибридная модель генератора электростанции позволяет с минимальными затратами модернизировать лабораторные стенды кафедры ЭЭС. Внедрение данной разработки позволит упростить обслуживание стендов, улучшить наглядность проводимых исследований и открыть возможность внедрения современных методик обучения [2] в образовательный процесс в соответствии с существующими требованиями.

Спроектированный программно-аппаратный комплекс является легко масштабируемым, что позволит в дальнейшем расширить его для решения других задач, в том числе задач построения систем управления и сбора данных [3], создания оборудования и тренировочных стендов для подготовки персонала в электроэнергетической отрасли.

### **Литература**

1. **Jeremy Blum.** Exploring Arduino, 2013.
2. **Bjarne Stroustrup.** Programming: Principles and Practice Using C++, 2014.
3. **Jeffrey Travis, Kim Kring.** LabVIEW for Everyone, 2010.

*Н.В. Петрухин, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В УЗЛАХ СЕТИ С РАЗНЫМИ УРОВНЯМИ СЕНСОРНОСТИ**

Напряжение является одним из ключевых режимных параметров узлов электроэнергетических систем (ЭЭС), поэтому его исследование представляет большой интерес и, что самое главное, было, остается и будет актуально. Контроль же его – это одна из задач, которая ставится перед инженерами и проектировщиками.

Моделью для исследования изменения напряжения в узлах сети будет неоднородная система. Неоднородность проявляется в том, что параметры режима некоторых элементов ЭЭС (узлов, связей) в среднем относительно сильнее реагируют на возмущения. Возмущения в разных местах ЭЭС могут вызывать заметную реакцию одних и тех же параметров режима: при разной локализации возмущений больше всего изменяются модули напряжения в одних и тех же узлах [2]. В связи с этим узлы сети разделяют на сенсорные, модули напряжений которых сильнее всего изменяются при одних и тех же внешних возмущениях, и жесткие, имеющие противоположные свойства [1].

Спрогнозировать и сопоставить предполагаемые изменения значения напряжения в узлах сети при изменении режима можно предварительно до расчета режима, зная исходные значения нагрузок и класс напряжения ЛЭП. Рассчитав значения собственных и взаимных проводимостей узлов и ранжировав их, можно выделить наиболее жесткие и сенсорные узлы. Далее проводить расчет необходимо с учетом полученной информации о проводимостях, нагружая по отдельности сенсорные и жесткие узлы. Также не стоит забывать о допустимых показателях, которые регламентируются в определенных документах [3]. По полученным результатам сопоставления напряжения в различных узлах можно сделать определенные выводы для данной системы. Это и есть главная цель работы.

### **Литература**

1. **Савоськин Н.Е.** Надежность электрических систем: учебное пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2004.
2. **Анализ** неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999.
3. **ГОСТ 13109–97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

*Е.В. Ревякина, К.С. Фатеева, студенты;  
рук-ли В.Г. Гольдштейн, д.т.н., проф.; А.В. Машков, асс.  
(СамГТУ, г. Самара)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ DATA MINING ДЛЯ ОЦЕНКИ АВАРИЙНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В законах РФ № 35–ФЗ «Об электроэнергетике» и № 399–ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности ...» подчеркиваются требования уточнения оценок надежности электрооборудования (ЭО), электрических сетей и их элементов. Для этого необходимо обеспечить анализ технологических нарушений и на основе репрезентативной информации [1] прогнозировать уровень аварийности ЭО.

Многофакторный анализ причин повреждений ЭО с целью оценки надежности элементов сети столь многообразен, что в редких случаях удается создать модель, удовлетворяющую требованиям эксплуатации. Для этого предлагается информационный подход к моделированию, использующий технологии интеллектуального анализа данных DataMining [2] в виде алгоритмов, построенных на ассоциативных правилах, устанавливающих закономерности между некоторыми событиями, и с помощью деревьев решений [2].

С этих позиций был проведен анализ аварийности ЭО электрических сетей Самарского региона. При этом по данным, представленным в [1], была определена выборка из 14 010 документов об авариях и отказах электроустановок, наиболее часто встречающихся в их эксплуатации. Ниже приводятся обобщенные полученные результаты анализа аварийности электроустановок и их элементов с помощью технологии DataMining, в частности для изоляторов и опор ВЛЭП и масляных выключателей.

Выявлены зависимости между временем на восстановление, причинами, характером повреждений и сложностью ЭО.

Установлены основные причины повреждений, определены зависимости между группами причин, а именно: какая причина отказа наиболее вероятно повлечет за собой иное определенное воздействие.

Определены классы ЭО по наиболее характерным причинам повреждения.

### **Литература**

1. **Складчиков А.А.** Оценка надежности и управление рисками технологических нарушений на воздушных линиях электропередачи: Дис. ... канд. техн. наук / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012.
2. **Технологии анализа данных.** Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. СПб.: БХВ-Петербург, 2007.

А.А. Сухов, студ.; рук. О.Н. Кузнецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНОЙ ЭЭС С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Основной причиной нарушения динамической устойчивости электрических систем являются большие возмущения, например короткие замыкания или отключения силовых элементов. Численное моделирование электромеханических переходных процессов довольно трудоемкая процедура [1]. Поэтому исследование необходимости учета технических ограничений, накладываемых на параметры режима работы генераторов при анализе показателей динамической устойчивости, является весьма актуальным.

В качестве ограничений рассматриваются ограничения, накладываемые на параметры режима обмотки ротора генератора, такие как ток возбуждения, напряжение, приложенное к обмотке возбуждения и др. Превышение допустимых значений тока и напряжения, приложенного к обмотке возбуждения, приводят к ускоренному старению изоляции обмотки.

В работе проведено исследование влияния указанных ограничений на условия динамической устойчивости системы в различных режимах работы. В качестве объекта исследования рассмотрена ЭЭС простейшей схемы: станция – шины бесконечной мощности. С помощью программного комплекса ЕТАР выполнен расчет электромеханических переходных процессов ЭЭС. При выполнении расчетов при утяжелении режимов с учетом и без учета ограничений, накладываемых на параметры режима работы генераторов, были проанализированы условия динамической устойчивости системы.

В результате анализа результатов расчетов были определены режимы работы, в которых учет технических ограничений, накладываемых на параметры режима работы генераторов, оказывает существенное влияние на условия динамической устойчивости [2].

Результатом данной работы является методика, которая позволяет проводить расчет только с учетом существенных ограничений, что упрощает расчетную модель.

### Литература

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебное пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985.
2. **Методические** указания по устойчивости энергосистем (утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277).

*К.А. Сыркин, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 220 кВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Увеличение пропускной способности требуется из-за постоянного развития электроэнергетических систем (ЭЭС). Одним из вариантов улучшения электропередачи является применение управляемых самокомпенсирующихся воздушных линий (УСВЛ) [1]. Их применение позволяет улучшить электромагнитные характеристики линий электропередачи (ЛЭП) и гибко ими управлять.

Идея широкого использования УСВЛ не получила согласия всех специалистов данной области, так как требовала целого комплекса нестандартных решений. К сегодняшнему дню проведено множество экспериментальных и теоретических исследований и показана целесообразность применения УСВЛ [2].

В данной работе исследовалось влияние УСВЛ-220 кВ на функционирование ЭЭС. По пропускной способности двухцепная УСВЛ-220 кВ может конкурировать с одноцепной ЛЭП-500 кВ стандартной конструкции [3], поэтому для рассмотрения выбрана расчетная модель УСВЛ-220 кВ. С ее помощью проанализировано влияние данного типа ЛЭП на пропускную способность и режимы в нескольких районах РФ, а также дана оценка целесообразности применения УСВЛ по сравнению с типовыми конструкциями ЛЭП.

Нарастающая тенденция к внедрению интеллектуальных сетей диктует использование все более эффективных в техническом и экономическом плане технологий, таких как управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии. Данная работа поможет выделить области перспективного использования УСВЛ-220 кВ, а также более детально рассмотреть вопрос влияния этих линий на режимы и пропускную способность.

### **Литература**

1. **Управляемые** линии электропередач / Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Кишинев: Штиица, 1984.
2. **Постолатий В.М.** Научная школа в области управляемых электропередач. Этапы исследований и библиография. Кишинев: Акад. наук Молдовы (АНМ), 2012.
3. **Методические** подходы к выбору вариантов линий электропередач нового поколения на примере ВЛ-220 кВ / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов и др. // Проблемы региональной энергетики. 2010. № 2.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Среди положительных аспектов передач постоянного тока (ППТ) можно отметить их высокое быстродействие в изменении их режимных параметров [1]. Данное обстоятельство позволяет осуществлять экстренное управление режимом ППТ для целей противоаварийного управления – предотвращения нарушения динамической устойчивости в аварийном режиме и статической устойчивости послеаварийного режима [2, 3]. Но вопрос организации управляющих воздействий для изменения режима ППТ с целью противоаварийного управления требует проработки для адекватности реалиям сегодняшнего дня.

В программной среде MatLab разработана модель двухмашинной энергосистемы, содержащей ППТ на преобразователях напряжения П1, П2 с шунтирующей передачей переменного тока (рис. 1). Выведены принципы регулирования активной мощности ППТ для предотвращения возникновения асинхронного хода в сечении, содержащем ППТ. Сформулирован подход к учету данного управляющего воздействия в алгоритме расчета системы противоаварийной автоматики.

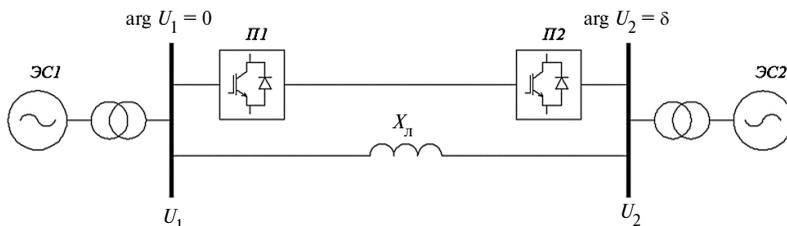


Рис. 1. Схема исследуемой энергосистемы

### Литература

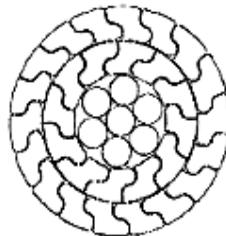
1. **Drivers** for technology selection in an embedded HVDC link. Case study: France-Spain Eastern Interconnection / Patricia Labra Francos, Silvia Sanz Verdugo, Carmen Longás Viejo, Luis Coronado Hernández // B4-110. 45<sup>th</sup> CIGRE Session, 24–29 August 2014.
2. **Гущина Т.А., Кошечев Л.А., Шлайфштейн В.А.** Вопросы управления мощностью передач постоянного тока от системы противоаварийной автоматики // Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений: Сборник научных трудов НИИПТ. 1994.
3. **Журнал «Известия НТЦ ЕЭС».** Сборник научных трудов. 2013. № 1 (68) / П.Я. Кац, М.А. Эдлин и др.

*Е.В. Утина, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОВОДОВ МАРКИ АЕРО-Z ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В настоящее время необходима модернизация некоторых перегруженных воздушных линий для увеличения их пропускной способности. При этом важно обеспечить надежное электроснабжение при минимизации затрат на реконструкцию. Решить проблему увеличения пропускной способности можно с помощью применения инновационных видов проводов, например проводов АЕРО-Z (рис. 1) [1]. Такие провода обладают рядом преимуществ перед проводами классического исполнения, но их стоимость выше [2].

Данная работа посвящена исследованию целесообразности применения проводов АЕРО-Z для модернизации воздушных линий 220 кВ. Опыт применения таких проводов уже был как за рубежом, так и в нашей стране. Использование АЕРО-Z за счет их гладкой поверхности дает конструктивные преимущества для тех трасс воздушных линий, где сильны ветровые нагрузки, снегопады и гололед. Однако в нашей стране этот вопрос недостаточно изучен. Актуальность работы подтверждается потребностью в исследовании возможностей и областей экономически выгодного применения проводов АЕРО-Z.



**Рис. 1. Поперечное сечение АЕРО-Z**

В ходе работы был проведен расчет температуры нагрева проводов с учетом солнечной радиации для компактных проводов АЕРО-Z на основе существующего алгоритма расчета проводов классического исполнения [3]. Была разработана программа, работающая в среде Windows, предназначенная для расчета параметров плавки гололеда: максимально допустимого тока плавки гололеда и времени плавки.

Практическая значимость данной работы состоит в определении экономически оправданных областей применения АЕРО-Z для модернизации воздушных линий 220 кВ при условии надежной передачи электроэнергии.

### **Литература**

1. **Колосов С.В., Рыжов С.В., Сыромятников С.Ю.** Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений // Энергетик. 2011. № 1.
2. **Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors / M. Gaudry, F. Choe, C. Hardy, E. Ghannoum // CIGRE Session Paris, 1998.**
3. **Зарудский Г.К., Рыжов С.В., Сыромятников С.Ю.** Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения // Вестник МЭИ. Электроэнергетика. 2008. № 2.

*В.П. Фонов, студ.; рук. Н.И. Зеленохат, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

В связи с развитием ЕЭС России, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, приходится сооружать гидростанции на значительном удалении от электропотребителей. Возникает необходимость в повышении их динамической устойчивости при больших возмущениях в виде коротких замыканий на связывающих их линиях электропередачи с основной частью ЕЭС.

Для удержания генераторов в синхронизме в особо тяжелых случаях применяется электрическое торможение в виде подключаемых кратковременно тормозных сопротивлений (поперечное электрическое торможение) [1]. Однако его эффективность может не обеспечиваться при используемых на практике алгоритмах управления циклом: включение/отключение, так как они не учитывают влияние приемной части электросистемы.

Предлагается применить продольное электрическое торможение в виде последовательно включенных в генераторную цепь тормозных сопротивлений [2].

Дается обоснование целесообразности рассмотрения в качестве варианта применения продольного электрического торможения, описываются алгоритмы управления им, а также даются разработанные расчетные формулы для выбора мощности коммутационных устройств и параметры тормозного сопротивления применительно к простой схеме ЕЭС.

Полученные результаты и подходы к анализу позволяют проводить более обширные исследования применительно к сложным ЕЭС с учетом действия продольного электрического торможения на удаленных электростанциях.

### **Литература**

1. **Зеленохат Н.И., Власова Т.А., Базаров Ф.А.** Методические предложения по выбору параметров устройства электрического торможения на электростанциях // Энергетик 2011. № 9.
2. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1985.

*С.С. Холопов, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ВЕКТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Один из путей повышения эффективности работы диспетчерского персонала заключается в сокращении скорости и объема информации, поступающей к диспетчеру. Исходя из этого минимизация участия диспетчера в поддержании уровней напряжения за счет автоматизации процесса управления элементами сетей позволит сократить информационное воздействие на него, а значит, в соответствии с [1] повысить эффективность его работы.

Практика использования фазопоротных устройств в сетях 220 кВ РФ, входящих в неоднородные сечения, ограничена. При этом опыт объединения средств регулирования режимных параметров общим управлением в РФ ограничивается сетями СВН или групповым управлением возбуждением генераторов при отсутствии подобных систем в сетях 110–220 кВ.

В результате проделанной работы разработан алгоритм централизованного управления напряжением и КРМ для тестовой сети 110–220 кВ, заключающийся в использовании коэффициентов чувствительности напряжений для ранжирования узлов сети по эффективности регулирования. Функционирование устройств управления по разработанному алгоритму исключило недопустимые значения напряжения в узлах практически при любых режимах работы сети. Общее управление позволило снизить число коммутаций устройств РПН и БСК на 20 % при аналогичных показателях функционирования сети. Результаты расчетов также показали снижение потерь активной мощности на 12 %.

Разрабатываемый алгоритм может использоваться в новых программно-технических комплексах на базе SCADA-систем, привнося в данные комплексы дополнительный функционал [2].

### **Литература**

1. **Гвоздев Д.Б.** Информационная оценка системы диспетчерского управления // Электрические станции. 2006. № 3.
2. **Егоров В., Кужеков С.** Интеллектуальные технологии в распределительном сетевом комплексе // Энергорынок. 2010. № 6.

## **МОДЕЛЬ КОМПЕТЕНЦИЙ ДИСПЕТЧЕРА ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Надежность работы единой электроэнергетической системы в значительной степени зависит от профессиональных знаний, умений и навыков персонала всех уровней иерархии оперативно-диспетчерского управления.

Анализ нарушений в работе энергетических систем показывает, что из множества причин, по которым оперативный персонал оказывается неспособным успешно ликвидировать аварийные ситуации, основными являются профессиональная непригодность и низкий уровень подготовленности к действиям в аварийных ситуациях. Статистика влияния человеческого фактора показывает, что 20–25 % всех нарушений режима работы блочного оборудования электростанций и 30 % всех нарушений в энергетике допускается по вине оперативного персонала [1].

Снижение уровня аварийности возможно с помощью применения в процессе обучения и тренировок диспетчерских тренажеров. Диспетчерские тренажеры создаются на базе современных средств компьютерной техники, на основе развитой системы средств отображения информации и управления имитируемыми объектами, режимами их работы. Число диспетчерских тренажеров составляет несколько десятков, их задачи различны, поэтому при подготовке диспетчера приходится использовать несколько тренажеров.

Для выбора диспетчерского тренажера, наиболее подходящего для обучения и тренировок, сформирована модель компетенций диспетчера оперативно-диспетчерского управления, требования к которой сформулированы исходя из функций, выполняемых диспетчером и требований к нему.

На основании сформированной модели компетенций диспетчера оперативно-диспетчерского управления разработаны лабораторные работы и выбран программно-технический комплекс, используемый в лабораторных работах для развития навыка управления энергетическими объектами в различных оперативных состояниях, включая аварийные и послеаварийные режимы.

### **Литература**

1. **Воронин В.Т.** Режимные тренажеры как средство обеспечения надежной работы оперативного персонала // Оперативное управление в электроэнергетике. 2005. № 1.

## Секция 51

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

*Председатель секции — к.т.н., доцент Г.В. Шведов  
Секретарь секции — ст. преподаватель С.А. Акчурина*

*К.С. Аверьянова, студ.; рук-ли В.П. Степанов, д.т.н., проф.;  
Н.В. Безменова, к.т.н. (СамГТУ, г. Самара)*

## **ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ**

В [1] приведены погрешности  $\delta(\Delta W_a)$  в оценке расчетных потерь электроэнергии  $\Delta W_a$  по ступенчатым  $I_\theta(t)$  графикам электрической нагрузки (ГЭН), которые возникают вследствие потери информации о фактических значениях коэффициента формы  $K_\Phi$  исходных  $I(t)$  ГЭН за счет преобразования его на участках осреднения  $\theta$ . Расчеты по оценке  $K_\Phi$  по известным значениям  $K_{\Phi\theta}$  проводились по выражению проф. Г.М. Каялова, связывающего дисперсию  $DI$  исходного и дисперсию  $DI_\theta$  ступенчатого ГЭН через экспоненциальную корреляционную функцию (КФ) с временем корреляции  $T_k$ . Показано, например, что для ГЭН общепромышленных электроприемников (ЭП) с  $K_{\Phi\theta} = 1,03$  при значениях  $\theta/T_k$  в диапазоне от 0 до 10 коэффициент формы увеличивается на 10 %, достигая при  $\theta/T_k = 10$  значения  $K_\Phi = 1,15$ . С увеличением  $K_{\Phi\theta}$ , например, до 1,05 значения  $K_\Phi$  увеличиваются еще больше, до 15 %, достигая значения  $K_{\Phi\theta} = 1,24$  при  $\theta/T_k = 10$ . Значения  $\delta(\Delta W_a)$  в расчетах  $\Delta W_a$ , например, для  $K_{\Phi\theta} = 1,03$  и  $T_k = 5$  мин составили при  $\theta = 30$  мин 12 %, а при  $\theta = 60$  мин – 23 %. Однако результаты, приведенные в [2], свидетельствуют, что  $I(t)$  графики таких специальных промышленных ЭП, как дуговые электросталеплавильные печи, буровые установки, углесосные станции описываются экспоненциально-косинусной КФ. Расчеты, проведенные, например для ГЭН с  $K_{\Phi\theta} = 1,03$ , параметрами графика  $k = \omega_0 / \alpha = 0,5$ , обусловленного периодичностью технологического процесса, и  $T_k/\theta = 10$  показали, что  $K_\Phi = 1,185$  и погрешность  $\delta(K_\Phi)$  в оценке  $K_\Phi$  составила 14 %. С увеличением  $k$  погрешность  $\delta(K_\Phi)$  возрастает, достигая при  $k = 1,0$  и  $K_\Phi = 1,27$  по-

грешности  $\delta(K_{\phi}) = 19 \%$ . Значения  $\delta(\Delta W_a)$  в оценке  $\Delta W_a$ , например, для  $K_{\phi\theta} = 1,03$ ,  $T_k = 5$  мин,  $k = 0,5$  и при  $\theta = 30$  мин составляет  $12,5 \%$ , а при  $\theta = 60$  мин –  $24 \%$ . При  $k = 1,0$  и  $\theta = 30$  мин  $\delta(\Delta W_a)$  составляет  $13 \%$ , а при  $\theta = 60$  мин –  $30 \%$ . Следует заметить, что с увеличением  $T_k$  погрешности в оценке  $\Delta W_a$  уменьшаются. Например, при  $T_k = 20$  мин для  $K_{\phi\theta} = 1,03$ ,  $k = 1,0$  и  $\theta = 60$  мин  $\delta(\Delta W_a)$  уменьшается с  $30$  до  $7 \%$ .

### Литература

1. **Гордеев В.И.** Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П.** Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 2003.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СОВОКУПНОСТИ КАБЕЛЕЙ ДО 1 кВ ЦЕХОВОЙ СЕТИ

Целью данной работы является разработка методики определения суммарных потерь активной мощности, позволяющей получить достоверный результат расчета при необходимом и достаточном минимуме информации. Математическое ожидание (МО) потерь активной мощности в совокупности из  $N_k$  кабелей до 1 кВ [1]

$$M[\Delta P_k] = M[k_{3,k}^2 \Delta P_k] = M[k_{3,k}^2] \cdot M[\Delta P_{k,пред}] + r[k_{3,k}^2; \Delta P_{k,пред}] \cdot \sigma[k_{3,k}^2] \cdot \sigma[\Delta P_{k,пред}], \quad (1)$$

где  $M[k_{3,k}^2]$  и  $\sigma[k_{3,k}^2]$  – МО и стандартное отклонение квадрата коэффициента загрузки кабелей;  $M[\Delta P_{k,пред}]$  и  $\sigma[\Delta P_{k,пред}]$  – МО и стандартное отклонение предельных значений потерь активной мощности в кабелях [2], определяемых через номинальный ток кабеля  $I_{к,ном}$  и его сопротивление  $R_k$ ; а  $r[k_{3,k}^2; \Delta P_k]$  – коэффициент корреляции между квадратом коэффициента загрузки и предельными потерями активной мощности [3].

На базе реальных данных цеховой сети с числом кабелей  $N_k = 135$  были исследованы зависимости коэффициента корреляции от числа кабелей в совокупности, которые показали, что при числе кабелей  $N_k \geq 50$  коэффициент корреляции незначителен (менее 0,1).

Следовательно, для определения МО потерь активной мощности при числе кабелей в совокупности  $N_k \geq 50$  можно использовать упрощенную формулу без использования корреляционного момента:

$$M[\Delta P_k] = M[k_{3,k}^2] M[\Delta P_{k,пред}]. \quad (2)$$

Суммарные потери активной мощности в совокупности кабелей до 1 кВ определяются числом кабелей в совокупности и МО потерь активной мощности:

$$\Delta P_{сум} = N_k M[\Delta P_k]. \quad (3)$$

### Литература

1. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. –4-е изд.. М: Наука, 1969.
2. **Грачева Е.И.** Потери электроэнергии в низковольтных сетях. Монография. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004.
3. **Конюхова Е.А.** Определение потерь мощности по потерям напряжения // Приложение к журналу «Энергетик». 2003. № 10.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО СЕКТОРА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

В настоящее время преобладает централизованное электроснабжение потребителей, которое при целом ряде достоинств сопровождается следующими недостатками: дополнительными затратами на сооружение сетей, потерями в этих сетях и рисками системных аварий.

Наличие собственного источника питания позволяет полностью или частично избавиться от вышеперечисленных недостатков.

В последнее время возрастает интерес к биоэнергетике на основе возобновляемых биологических ресурсов. Одно из ответвлений этого направления – утилизация биогаза.

Теоретический потенциал биогаза с содержанием метана 60 % составляет  $6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$  [1]. По предварительным оценкам с помощью биогаза, полученного из продуктов нашей жизнедеятельности, в сутки возможно выработать до  $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  электроэнергии на человека, что составляет 30–50 % его среднестатистической потребности. Генерация и объемы добычи биогаза в течение года относительно стабильны, тогда как электрические и тепловые нагрузки подвержены значительным колебаниям по сезонам и времени суток. Вследствие этого в отдельные периоды расход утилизируемого биогаза будет недостаточен для покрытия пиковых нагрузок, а при спаде потребляемых мощностей – избыточен.

Для решения данной проблемы в рамках магистерской диссертации разрабатывается биогазовый комплекс с устройством регулирования выхода биогаза, отличительной чертой которого является оснащение известной биогазовой установки [2] управляемой системой подогрева реактора, которая позволяет контролировать температуру брожения биомассы и соответственно выход биогаза в зависимости от электрической нагрузки.

В будущем использование собственного источника питания на основе данного биогазового комплекса позволит увеличить надежность электроснабжения потребителей и повысить энергоэффективность путем экономии на строительстве сетей электроснабжения.

### Литература

1. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки: практическое пособие. Zorg Biogas, 1996. (Перевод с немецкого выполнен компанией Zorg Biogas в 2008 г.)
2. Веденев А.Г., Маслов А.Н. Строительство биогазовых установок: краткое руководство. Бишкек: Евро, 2006.

## **ВЛИЯНИЕ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ СЕТИ**

Все большую актуальность приобретают вопросы энергосбережения. Общепринятый способ наращивания генерирующих мощностей накладывает ограничения на темпы развития промышленности и социальной сферы. В современных условиях имеет место рост тарифов на электроэнергию (ЭЭ) с одновременным ростом вывода генерирующих мощностей по причине морального и технического старения. Загруженность сетевой инфраструктуры также накладывает ограничение на подключение новых потребителей. Собственников производства в таких условиях привлекает строительство собственных объектов малой генерации (МГ). Помимо определения предпочтительных мест установки агрегатов МГ [1], актуальным становится вопрос оценки влияния МГ на электрические сети (ЭС) и системы электроснабжения (СЭС) в целом.

В работе рассмотрена районная электрическая сеть (РЭС) напряжением 220–110 кВ с одним источником питания и шестью узлами нагрузки. Агрегаты МГ подключены к распределительному пункту (РП) напряжением 10 кВ одной из СЭС, подключенной к РЭС. На основании оценки экономической привлекательности проекта для собственника предприятия, принимая во внимание сложившуюся конъюнктуру рынка, выяснилось, что, несмотря на значительные капиталовложения, установка МГ позволяет значительно снизить затраты на потребление ЭЭ. В современных условиях с учетом возможных рисков расчетный срок окупаемости составил семь лет.

В вероятностной постановке задачи была оценена степень влияния МГ на параметры сети. В соответствии с заданными числовыми характеристиками случайной величины (ЧХСВ) мощностей нагрузок и генерации агрегатов МГ при соблюдении условия невыдачи излишков мощности в сеть был задан желаемый режим работы агрегатов МГ. Определено количество, тип и мощность машин МГ. Рассчитаны ЧХСВ мощностей нагрузок элементов ЭС и СЭС и проведено сравнение с вариантом без установки МГ. В результате использования МГ загрузка основного силового оборудования ЭС и СЭС снижается, появляется возможность подключения дополнительных потребителей к СЭС. Если же сеть вновь сооружаемая, то установка МГ позволяет снизить сечения КЛ и ВЛ, а также уменьшить установленную мощность трансформаторов, что сказывается на снижении стоимости сети.

### **Литература**

1. **Тарасенко В.В.** Оптимизация развития и функционирования системы энергоснабжения с распределенной генерацией: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУРГУ, 2012.

*Д.С. Бочаров, студ.; А.В. Валянский, инж.;  
рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 380 В НА УРОВЕНЬ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ, КРАТНЫХ ТРЕМ**

Токи нулевой последовательности на основной и высших частотах, распространяясь по элементам электрической сети, формируют на их сопротивлениях падения напряжения, которые в свою очередь искажают напряжение в узлах нагрузки [1].

В последние годы инструментальный контроль показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в сетях 380 В показал, что несимметрия напряжений по нулевой последовательности и высшие гармоники напряжения, кратные трем, не соответствуют требованиям действующих нормативных документов [2]. Также выявлены нарушения правил эксплуатации сетевого электрооборудования (ЭО): ненадлежащее состояние нулевых проводников на стороне низкого напряжения (НН) трансформаторных подстанций (ТП) 6–10/0,4, несвоевременное проведение текущего и капитального ремонта силовых выключателей и т.п. – параметры которого оказывают влияние на значения рассматриваемых ПКЭ. Номенклатура ЭО электрических сетей 380 В достаточно широка, поэтому возникает задача в определении тех элементов, которые вносят наибольший вклад в ухудшение качества электроэнергии.

В данной работе исследовалось влияние следующих элементов: 1) силовые трансформаторы (схема соединения обмоток, конструкция магнитопровода, техническое состояние); 2) заземляющие устройства (наличие повторного заземления, глубина залегания и сечение заземлителей, тип грунта); 3) контактные соединения (степень окисления, контактное нажатие, способ обработки контактных поверхностей); 4) кабельные линии (особенности конструкции, сечение проводников).

На основании полученных результатов была предложена методика инструментальной оценки влияния элементов электрической сети 380 В на уровень несинусоидальности и несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

### **Литература**

1. **Управление** качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Ю.В. Шаров и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. **ГОСТ 32144–2013**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

## **ВАЖНЫЕ ФАКТОРЫ ПРИ ВЫБОРЕ УКРМ**

Вопрос компенсации реактивной мощности в рамках программ, направленных на энергосбережение и оптимизацию работы электрических сетей, становится все более актуальным. При выборе устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), необходимыми являются сведения о типах и мощностях компенсаторов. Однако опыт эксплуатации УКРМ показал, что вопрос технического обслуживания и грамотной настройки установки является не менее важным, ведь при ошибочных действиях УКРМ работает неэффективно, фактически не оправдывая вложенных денег, либо и вовсе выходит из строя. Ремонт же порой оказывается невозможным вследствие значительных механических разрушений, возникающих при аварии на установке.

Безусловно, первым шагом перед выбором и установкой УКРМ должен быть комплексный анализ качества электрической энергии в сети предприятия, проведенный с помощью современных приборов и дающий реальную картину о поведении, свойствах и потреблении электрической энергии в течение как минимум одной рабочей недели.

Затем необходимо выбрать число ступеней регулирования. Если подойти к этому вопросу несерьезно, то впоследствии можно получить очень неприятный экономический «укол» после того, как УКРМ не отработают то время, на которое вы рассчитывали.

Следующим «подводным камнем» при выборе типа и «начинки» УКРМ являются присутствующие практически в любой сети высшие гармоники. Имели место случаи, когда при аналитически правильном выборе установки выходили из строя за 5–6 месяцев без явной на то причины. Проведенный анализ показал, что чаще всего причиной выхода из строя УКРМ становилось постоянное воздействие на них высших гармоник. А при использовании в УКРМ разрядных резисторов происходит их значительный нагрев и старение.

Не секрет, что срок эксплуатации УКРМ существенно зависит от температуры.

Очень опасны для УКРМ и броски напряжения. И если они присутствуют в сети постоянно, то необходимо каким-либо образом защищать от них УКРМ, например, используя ОПН.

Однако проведенные расчеты говорят об оптимистичном сроке окупаемости при внедрении УКРМ. Применять УКРМ можно, а главное нужно.

*М.Ю. Гуляев, студ.; рук. Е.Ю. Свешникова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕНСОРНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ**

В процессе функционирования электроэнергетическая система подвергается большим и малым внешним возмущениям и реагирует на них изменением переменных режима. Реакция на возмущения зависит как от состава и величины возмущений, так и от таких инвариантных к режиму факторов, как топология и параметры элементов схемы сети.

Наличие инвариантных к режиму факторов, названных слабыми местами, является причиной того, что возмущения, локализуемые в разных местах ЭЭС, вызывают заметную реакцию модулей и фаз напряжений, перетоков мощности и потерь напряжений в одних и тех же узлах и связях. Элементы схемы сети, чьи переменные режима изменяются в большей степени при внешних воздействиях, названы сенсорами.

При случайном характере возмущений переменные, характеризующие состояние электрической сети, такие как узловые напряжения, перетоки мощности, также являются случайными. Методы вероятностного потокораспределения позволяют представить их числовыми характеристиками или плотностями распределения. Знание числовых характеристик и предельно допустимых значений для переменных позволит выделить те переменные, для которых нарушение предельных значений наиболее вероятно, что и является целью работы.

Новизна работы заключается в предложении использовать для выделения сенсорных переменных числовые характеристики, полученные методами вероятностного потокораспределения.

На данном этапе посчитаны числовые характеристики случайных величин мощности нагрузок и выдвинуты гипотезы о законах распределения этих величин.

### **Литература**

1. **Фокин Ю.А.** Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Болоев Е.В.** Сравнение методов вероятностного потокораспределения в ЭЭС. Информационные и математические технологии в науке и управлении // Труды XVII Байкальской Всероссийской конференции. Часть III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012.
3. **Болоев Е.В.** Использование вероятностного потокораспределения для анализа неоднородностей в ЭЭС. Глава 1. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012.

*Н.А. Иванов, студ.; рук. Е.А. Конохова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 10/0,4 кВ**

Одним из основных вопросов, решаемых как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем промышленного электроснабжения, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий выбор целесообразных источников, расчет и регулирование их мощности, размещение источников в системе электроснабжения. Оптимальное решение должно удовлетворять интересам как электроснабжающих систем, так и потребителей электроэнергии с учетом эффекта во всей системе в целом [1].

Задачи максимальной экономии ресурсов и повышения качества промышленной продукции являются на современном этапе одними из наиболее актуальных. В области электроэнергетики эти задачи сводятся к снижению потерь электроэнергии в сетях и повышению ее качества в точках потребления. Наиболее эффективным способом снижения потерь является установка в сетях компенсирующих устройств [2]. Поэтому целесообразно размещение компенсирующих устройств у потребителей. Таким образом, компенсация реактивной мощности позволяет [3]:

- 1) уменьшить потери активной мощности в распределительных сетях 10 и 0,38 кВ;
- 2) увеличить пропускную способность понижающих трансформаторов 10/0,4 кВ;
- 3) снизить потери напряжения в распределительных сетях и понижающих трансформаторах 10/0,4 кВ.

В данной работе исследуется СЭС промышленного предприятия, а в частности определение оптимального коэффициента реактивной мощности нагрузки трансформаторов 10/0,4 кВ.

### **Литература**

1. **Конохова Е.А.** Электроснабжение: учебник. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.
2. **Конохова Е.А.** Выбор мощности батарей конденсаторов в цеховых сетях промышленных предприятий с учетом режимов напряжений // *Электричество*, 1998. № 4.
3. **Железко Ю.С.** Методическое обеспечение задач компенсации реактивной мощности и повышение качества ЭЭ в сетях промышленных предприятий // *Промышленная энергетика*. 1986.

## **ВЫБОР СПОСОБА КАНАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

На начальных этапах проектирования сооружений различного назначения одним из основополагающих вопросов является вопрос выбора системы канализации электроэнергии. На данный момент в России ни один из нормативных документов не имеет четких рекомендаций по выбору шинно-проводной или кабельной системы электроснабжения зданий. Все существующие нормативы указывают на необходимость технико-экономического расчета в каждом индивидуальном случае [3]. Но при росте нагрузок и увеличении объемов строительства необходимо ускорить выбор системы канализации путем создания единого алгоритма выбора шинно-проводных или кабельных систем, универсального для всех потребителей. Подобная унификация позволит упростить и ускорить начальный этап проектирования, что приведет к общему увеличению производительности проектных организаций.

На сегодняшний день шиннопроводы широко применяются на промышленных предприятиях и электростанциях и подстанциях [1]. Для этих областей неоднократно составлялись алгоритмы выбора способа канализации [2]. Поэтому исследуемыми объектами в работе выбраны объекты гражданского строительства – высотное жилое здание и торгово-развлекательный комплекс.

В работе проведен подробный анализ технико-экономических критериев и выявлено, что наиболее влияющими факторами на выбор целесообразного способа канализации являются пропускная способность, потери напряжения, надежность электроснабжения, капиталовложения в сеть и затраты на реконструкцию сети [1]. На основе этих факторов составлена математическая модель, позволяющая при заданных начальных условиях однозначно определять более эффективный способ электроснабжения объектов гражданского строительства.

### **Литература**

1. **Овчаренко А.С., Рабинович М.Л.** Технико-экономическая эффективность систем электроснабжения промышленных предприятий. Киев: Техніка, 1977.
2. **Семчинов А.М.** Токопроводы промышленных предприятий. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.
3. **Современные шиннопроводы.** / С.В. Воронин, Н.Н. Курочкин, А.Н. Матанцев, С.П. Мокринский. М.: Энергия, 2010.

*В. Кармона-Щедрин, студ.; рук. Е.А. Конюхова, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ САХАРНОГО ЗАВОДА (КУБА)**

В системе электроснабжения сахарного завода, расположенного на Кубе (Мартинес Прието), установлено шесть трансформаторов с номинальной мощностью 250 кВА, обеспечивающих электроэнергией как промышленных, так и коммунально-бытовых потребителей поселка. Часть трансформаторов, в связи с увеличением электропотребления населением, имеют систематическую перегрузку на 10–23 %, что вызывает повышенный износ изоляции и уменьшение срока службы этих трансформаторов.

Целью данной работы является выявление возможности уменьшения электропотребления в период максимальных нагрузок трансформаторов 5/0,12 кВ сахарного завода. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: анализ статистических характеристик графиков нагрузок трансформаторов; выявление основных причин возникновения перегрузок трансформаторов и определение путей их устранения при существующих на Кубе климатических условиях; разработка мероприятий по уменьшению максимальных нагрузок и выравниванию графика трансформаторов 5/0,12 кВ по условию достижения нормального срока их службы.

По результатам измерений в течение шесть суток в системе электроснабжения сахарного завода была проведена статистическая обработка и получены совокупности часовых значений, составлена компьютерная база данных суточных графиков активных, реактивных и полных нагрузок для каждого из шести трансформаторов 5/0,12 кВ. Из этих данных видно, что максимальные значения активных мощностей нагрузок трансформаторов в основном приходятся на 13–14 ч, а полных мощностей – на 9–11 ч, что совпадает с максимальными реактивными нагрузками. Также были определены статистические характеристики исходных нагрузок за сутки для каждого трансформатора, а именно: средние значения; среднеквадратические отклонения, максимальные значения нагрузок; коэффициенты загрузки в максимум и в среднем за сутки. Значения коэффициентов корреляции между графиками полных нагрузок трансформаторов в период максимальных нагрузок близки к 1, в среднем за сутки 0,5–0,8. Коэффициенты загрузки трансформаторов по полной мощности в максимум изменяются в пределах 0,6–1,23, т. е. наблюдаются систематические перегрузки ряда трансформаторов в период максимума [1].

### **Литература**

1. **Конюхова Е.А.** Электроснабжение. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

*А.А. Кирос, М.А. Силаев, студенты; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭФИОПИИ**

На сегодняшний день проблема качества электроэнергии является актуальной для подавляющего большинства стран мира. Не являются исключением и государства в Африке, где динамичное развитие экономики за последнее десятилетие привело к ряду изменений в электроэнергетике. Так, например, в Эфиопии изменение структуры нагрузки в виде увеличения количества предприятий легкой и пищевой промышленности и распространения нелинейных электроприемников привело к ухудшению качества электроэнергии.

Генерирующие мощности в Эфиопии распределены между гидроэлектростанциями (92,49 %), дизельными теплоэлектростанциями (7,15 %) и геотермальными станциями (0,37 %). В высоковольтных электрических сетях используются номинальные линейные напряжения 400, 230, 132, 66, 45 и 33 кВ, в низковольтных сетях – 0,38 кВ. Частота тока в энергосистеме составляет 50 Гц. Передача электроэнергии осуществляется в основном посредством воздушных линий электропередачи. Наиболее часто нарушения требований качества электроэнергии наблюдаются по установившемуся отклонению напряжения: вследствие больших потерь напряжения в сетевом оборудовании и отсутствия централизованного регулирования напряжения имеют место систематические жалобы коммунально-бытовых потребителей и нарушения автоматизированного технологического процесса на промышленных объектах.

С учетом перечисленных специфических особенностей электрической сети Эфиопии, с помощью актуальной схемы электрических соединений и информации о месторасположении наиболее мощных искажающих нагрузок проведены расчеты установившихся режимов сети и выявлены узлы с низким качеством напряжения. По итогам расчетов предложены мероприятия, позволяющие добиться повышения качества электроэнергии в Эфиопии сразу по нескольким показателям и одновременного снижения потерь электроэнергии, что является одной из приоритетных задач правительства этой страны в области развития электроэнергетики [1].

### **Литература**

1. **Федеративная** демократическая республика Эфиопия. Страновая справка [Электронный ресурс]. <http://interraexport.ru>

*К.Р. Королёв, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **СОВРЕМЕННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ – ИСТОРИЯ ЕЕ ОТКРЫТИЯ И БЕРЕЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ»**

В рамках дисциплины «Приемники и потребители электрической энергии» разработан анимационный видеофильм продолжительностью 23 минуты, включающий в себя следующие разделы:

- Краткая история электротехники. Показано появление термина «электричество», создание первых электростатических машин, опыты Уильяма Гильберта и Стивена Грея;
- Основы теории цепей. Раскрываются понятия электрической энергии, напряжения, тока и сопротивления. Показано, как электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии;
- Энергосбережение. Освещены вопросы рационального использования электрической энергии в быту на примере источников света, холодильников, электрических плит и других электроприемников.

Использование данного фильма в учебном процессе позволяет сформировать у учащихся образ, облегчающий понимание физических процессов производства и потребления электрической энергии, повышает культуру потребления электрической энергии в быту.

Актуальность разработки данного учебно-методического комплекса и его новизна обусловлены отсутствием его современных аналогов, а также важностью освещенности тем для студентов, обучающихся по специальности «Электроснабжение».

При разработке аудиовизуальной части учебного фильма использовались материалы, представленные в [1].

Данный учебно-методический комплекс имеет перспективы использования в курсах «Введение в специальность», «Приемники и потребители электрической энергии», а также может использоваться учащимися для самостоятельного изучения освещенных в нем тем. Кроме того, он может быть полезен при проведении занятий на базе музея «Огни Москвы» для детей старшего школьного возраста.

### **Литература**

1. **История** электротехники / под ред. И.А. Глебова. М.: Издательство МЭИ, 1999.

*М.Д. Купцова, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ГИБКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ДЕФИЦИТА**

Работа посвящена одному из наиболее важных вопросов современной энергетики – обеспечению надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей и повышению устойчивости энергосистемы при возникновении аварийных ситуаций, сопровождающихся дефицитом мощности.

При возникновении аварийных ситуаций в распределительных сетях для минимизации ущерба возникает необходимость гибкого управления нагрузкой.

В настоящее время управление нагрузкой реализуется с помощью устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР) путем отключения части потребителей. При этом зачастую к отключаемым линиям подключены потребители различных категорий надежности электроснабжения [2]. Полное отключение таких линий приводит к переключению потребителей I и II категорий надежности на резервные линии, что в свою очередь может привести как к их перегрузке, так и полному отключению от энергосистемы данных потребителей.

В ходе исследования проведен анализ современной противоаварийной автоматики [1,3] и разработаны предложения по ее совершенствованию. Предложены структурная схема и алгоритм работы устройства [4], ограничивающего мощность и обеспечивающего выборочное отключение потребителей на более низком классе напряжения (0,4 кВ) по командам, поступающим с питающих центров, вместо отключения питающих линий более высоких классов напряжения.

В перспективе – исследование разработанного комплекса мероприятий и внедрение в уже существующую энергосистему с целью повышения надежности электроснабжения за счет гибкого ограничения мощности потребителей.

### **Литература**

1. **СТО 59012820.29.240.001–2011.** Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта.
2. **РД 34.20.185-94.** Инструкция по проектированию городских электрических сетей. Глава 4.1. Категории электроприемников, надежность электроснабжения.
3. **Павлов Г.М., Меркурьев Г.В.** Автоматика энергосистем. СПб.: Издание Центра подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001.
4. **Заявка № 2014114890/07(023371)** на полезную модель «Устройство регулирования передаваемой мощности в распределительных сетях при дефиците мощности в энергосистеме».

## **МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕОДНОРОДНЫМИ ГРАФИКАМИ НАГРУЗКИ**

Суммарная электрическая нагрузка городских сетей формируется из нагрузок коммунально-бытовых потребителей, промышленных предприятий, электрифицированного транспорта и др. Эти группы потребителей имеют разные характеры нагрузок. Различными при этом получаются и графики отклонений напряжения у потребителей [1]. Возникает задача разработки методики регулирования напряжения в сети для обеспечения качества электроэнергии по установившемуся значению отклонения напряжения у наибольшего возможного числа потребителей.

В результате расчетов было получено, что при централизованном регулировании требуемый уровень напряжения в узлах сети обеспечивается только в случае, когда потребители, присоединенные к шинам центра питания (ЦП), однородны. Изменение нагрузок для них характеризуется примерно однотипными графиками [1]. Рассмотрен случай объединения потребителей в соответствии с характером их нагрузки, когда линии, питающие потребителей, близких по характеру нагрузки, объединены и снабжены линейными регулировочными трансформаторами. Расчетным путем было получено, что этот способ обеспечивает качество напряжения в узлах сети, однако он является весьма затратным. Также было совместно рассмотрено централизованное регулирование напряжения в ЦП и установка средств местного регулирования у потребителей, которым централизованного регулирования оказалось недостаточно, по методике, указанной в [1], в соответствии с которой производится выбор мощности и мест установки батарей конденсаторов в качестве средств местного регулирования напряжения. Однако данная методика устарела и не дает положительных результатов применительно к графикам, характеризующим изменение нагрузки в настоящее время.

Разработана методика, в основу которой положен выбор закона централизованного регулирования в ЦП, который обеспечил бы качество напряжения у максимально возможного числа потребителей, и выбор по технико-экономическим показателям средств местного регулирования напряжения, их мощности и мест установки.

Данная методика может быть использована для обеспечения качества напряжения по установившемуся отклонению напряжения применительно к неоднородным графикам нагрузки.

### **Литература**

1. Маркушевич Н.С., Солдаткина Л.А. Качество напряжения в городских электрических сетях. М.: Энергия, 1975.

*Н.А. Курилова, студ.; рук. А.В. Кочкина, ст. преп.  
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*

## **ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Одной из тенденций современной политики промышленных предприятий является поиск методов улучшения экономических показателей за счет снижения доли энергозатрат в себестоимости готовой продукции. Одним из решений данного вопроса является рациональное распределение активных мощностей между разнородными генерирующими источниками промышленного предприятия.

Для решения поставленной задачи была осуществлена разработка методики оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения, позволяющая определять рекомендуемые загрузки генераторов с учетом потерь мощности в распределительных сетях. Основными этапами данной методики являются: сбор исходной информации о генерирующем и котельном оборудовании, расчет себестоимости 1 т свежего пара, разработка технико-экономических моделей генераторов промышленных электростанций, ввод исходной информации в программно-вычислительный комплекс (ПВК) «КАТРАН», определение экономически целесообразных нагрузок генераторов, анализ полученных результатов, разработка рекомендаций по улучшению эффективной работы собственной генерирующей базы крупного предприятия. Определение рекомендуемых нагрузок источников электрической энергии осуществляется с помощью модуля «Оптимизация» ПВК «КАТРАН», разработанного на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «МГТУ» им. Г.И. Носова. Алгоритм расчета основывается на сочетании модифицированных методов динамического программирования и последовательного эквивалентирования, основные положения метода приведены в [1, 2].

Разработанная методика позволяет определять рекомендуемые загрузки генераторов, учитывая при этом отличительные особенности промышленных систем электроснабжения.

### **Литература**

1. **Малафеев А.В., Игуменшев В.А., Хламова А.В.** Алгоритм оптимизации распределения активной мощности между электростанциями промышленного предприятия и узлами связи с энергосистемой с учетом потерь в распределительной сети// Промышленная энергетика. 2011. № 9.
2. **Кочкина А.В., Малафеев А.В.** Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013.

## **РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЛЬМЕНИТОВОГО РУДНИКА В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ**

Россия обладает огромными запасами титаномагнетитовых ванадий-содержащих руд – около 50 % мировых запасов железных руд этого типа. Всего на территории России выявлено более 40 месторождений. Наибольшими запасами обладает юг Урала и север Амурской области – Куранакское месторождение, расположенное вблизи БАМа [1]. Разработка данного рудника (далее – Рудник) ведется ООО «Олекминский рудник» с 2007 года.

Результаты, полученные испытательной лабораторией по качеству электроэнергии (ИЛ КЭ) МЭИ на центре питания Рудника, показали систематические нарушения нормативных требований по искажению формы кривой напряжения, что приводит к частым отключениям оборудования Рудника. Технологический процесс Рудника не допускает длительного простоя агрегатов, особенно в зимнее время (имеет место размораживание труб отвода воды для помывки руды – «хвостов»).

Среди основных негативных последствий при отказе оборудования Рудника можно выделить: отключения и простои технологического оборудования, вызванные авариями и переключениями во внешних сетях; прямые убытки, связанные с недовыпуском конечной продукции; косвенные убытки из-за возможных ремонтных работ механического оборудования, а также издержек на обслуживание; уменьшение срока службы электрооборудования.

В ходе исследований был проведен анализ данной проблемы, установлено предельное время перерыва электроснабжения, в течение которого полностью прекращается производственный процесс, и разработаны предложения для поддержания технологического процесса на требуемом уровне:

- ввод резервных источников питания при аварийных ситуациях;
- установка и использование средств повышения уровня показателей КЭ.

### **Литература**

**1. Быховский Л.З., Пахомов Ф.П., Турлова М.А.** Минерально-сырьевая база и перспективы комплексного использования титаномагнетитовых и ильменитовых магматогенных месторождений России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. Семинар № 8.

*А.М. Ооржак, студ.; рук. Е.Ю. Свешникова, к.т.н., ст. преп.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА УЩЕРБА ОТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И СНИЖЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ИЗ-ЗА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

На современных промышленных предприятиях значительное распространение получили нелинейные нагрузки. К их числу относятся в первую очередь различного рода вентильные преобразователи, главным образом тиристорные, установки дуговой и контактной электросварки, дуговые сталеплавильные и руднотермические печи, газоразрядные лампы, силовые магнитные усилители и трансформаторы [1]. С учетом того, что современные предприятия имеют тенденцию увеличения единичной мощности оборудования, становится актуальной проблема их влияния на систему электроснабжения.

В настоящей работе на примере спроектированного машиностроительного завода, который содержит в себе такие нелинейные нагрузки, как тиристорные регуляторы температуры печи сопротивления и преобразовательные установки гальванического цеха, рассчитывается экономический ущерб, обусловленный пониженным качеством электроэнергии.

Для достижения указанной цели в MatLab была разработана математическая модель системы электроснабжения нелинейной нагрузки, позволяющая определить состав и уровни высших гармонических составляющих токов и напряжений.

Результаты моделирования могут быть использованы при разработке мероприятий по снижению уровней высших гармоник.

### **Литература**

1. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000.

## **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ДЛЯ ОБЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ В ЖИЛЫХ ДОМАХ**

В настоящее время вопрос об экономии электроэнергии является актуальным во всем мире. Около 40 % мирового энергопотребления приходится на электроприемники жилых домов. Существует множество решений по снижению общего энергопотребления в городах и на предприятиях, но все они требуют немалых капитальных вложений. В данной статье предлагается вариант экономии электроэнергии в сети общедомового освещения, не требующий серьезных затрат.

Снизить энергопотребление жилых домов можно заменив лампы накаливания в подъездах на специальные светодиодные светильники с датчиками движения [1]. Потребляемая мощность светодиодных светильников 6 Вт, а световой поток соответствует световому потоку лампы накаливания 95 Вт [2]. В качестве примера рассматривался типовой пятиэтажный черыртерхподъездный дом на 80 квартир (без лифта). Общее время освещения подъезда за сутки 10 ч (с 18.00 до 8.00), а при наличии датчика это время можно сократить до 2–2,5 ч. В этом случае применение подобных светильников позволит сократить потребление электроэнергии за год более чем в 1000 раз.

Кроме того, достоинствами таких светильников является повышенный срок службы и антивандальное исполнение, что позволяет менять данные светильники раз в 13–14 лет, тогда как лампу накаливания необходимо менять 3–4 раза в год [3]. Срок окупаемости такой замены за счет экономии энергии чуть больше года, и начиная со следующего года потребление электроэнергии сократятся на 99 %.

Таким образом, данный способ является не только энерго-, но и экономически эффективным.

### **Литература**

1. **Дмитриев С.К.** Датчики движения и присутствия – реальная экономия электроэнергии // Энергосбережение. 2009. № 7.
2. **Слободник Э.Б.** Система управления освещением на светодиодах // Энергосбережение. 2008. № 8.
3. **Полищук А.Г.** Светодиодные светильники – эффективный метод решения проблемы энергосбережения // Энергосбережение. 2008. № 3.

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕРВАЛА УСРЕДНЕНИЯ РЕГИСТРАЦИИ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ НА ПОЛУЧАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Современные автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), устанавливаемые в районных электрических сетях, предоставляют им измеренные значения активных и реактивных мощностей, напряжения и токов для каждого потребителя с дискретностью в 1 ч. Очевидно, что данной информации недостаточно для оценки показателей качества электроэнергии, в частности установившегося отклонения напряжения. По требованиям [1] интервал усреднения должен быть равен 10 мин.

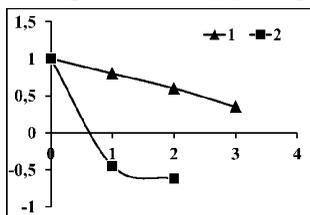


Рис. 1. Значения корреляционных функций:

1 – медленно изменяющаяся функция;  
2 – быстроизменяющаяся функция

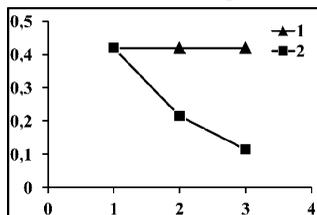


Рис. 2. Графики изменения среднеквадратического отклонения:

1 – медленно изменяющаяся функция;  
2 – быстроизменяющаяся функция

Однако на основании множества часовых измерений можно анализировать и требуемые короткие периоды. К примеру, рассмотрим две функции (быстро и медленно изменяющиеся), имеющие одинаковый закон распределения случайной величины, но с различными автокорреляционными функциями (рис. 1). На каждом шаге усреднения обеих функций можно заметить, что у имеющей резко убывающую автокорреляционную функцию уменьшение среднеквадратического отклонения происходит значительно быстрее (рис. 2).

Так, для ряда данных нагрузок, полученных на длительном интервале измерений и при этом имеющего пологую автокорреляционную функцию, при увеличении интервала усреднения СКО напряжения будет изменяться незначительно. Верным будет и обратное: при пологом СКО уменьшение интервала не будет оказывать сильного влияния. Исходя из этого можно проводить первичную оценку данных АСКУЭ для проверки значений установившегося отклонения напряжения на соответствие требованиям [1].

### Литература

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

## **ПОСТРОЕНИЕ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ С УЧЕТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Энергосистемы мегаполисов (МП), сформированные, построенные и реализованные сегодня по традиционным принципам, с большой вероятностью не смогут в полной мере удовлетворить требованиям, которым они должны будут отвечать в самой близкой перспективе, что определяет необходимость перехода к инновационным направлениям их развития. Часть из них можно сформулировать следующим образом:

Использование высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в передаче и распределении электроэнергии можно рассматривать как альтернативу глубокого ввода на напряжениях 110 кВ и выше, что особенно важно для систем электроснабжения МП (СЭС МП).

Исключение промежуточных ступеней трансформации позволяет перевести распределительные сети на напряжение 10÷20 кВ при сохранении и даже увеличении пропускной способности сети.

Несомненные положительные результаты применения ВТСП технологий и оборудования – значительное снижение потерь электрической мощности и энергии, стоимости подстанций.

Трансформаторы и токоограничители ВТСП снимают проблему роста токов КЗ, ограничивая их электродинамические и термические воздействия на все виды электрооборудования СЭС МП [1].

Снижение вредных влияний для окружающей среды, улучшение пожарной и экологической безопасности.

Применение технологий ВТСП для создания локальных, а затем и глобальных электрических сетей и систем – это одно из наиболее масштабных и перспективных направлений инновационного преобразования современной электроэнергетики. Эти технологии позволяют снять большую часть ограничений на размещение источников и потребителей энергии и значительно сократить ее потери. Они инновационно изменяют принципы действия, конструкцию, проектирование и организацию эксплуатации электроэнергетических комплексов в целом и отдельных элементов [2].

### **Литература**

1. **Манусов В.З.** Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с ВТСП // Известия ТПУ. 2013. № 4.
2. **Гольдштейн В.Г.** Применение инновационных типов ЭО в системах электроснабжения современных мегаполисов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3.

*Д.М. Серов, Д.С. Бочаров, студенты; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10/0,4 кВ**

В 2014 году испытательной лабораторией по качеству электрической энергии (ИЛ КЭ) НИУ «МЭИ» был проведен инструментальный контроль КЭ в распределительных электрических сетях Московской области. Отличительной особенностью этих сетей является большая протяженность линий 10 и 0,4 кВ, а также малая плотность нагрузки. В результате контроля КЭ были выявлены частые нарушения требований стандартов [1] по следующим показателям: установившемуся отклонению напряжения, коэффициенту несимметрии по обратной и нулевой последовательностям и коэффициентам  $n$ -й гармонической составляющей.

Сопоставление параметров сети с результатами измерения показателей КЭ показало, что в большинстве случаев сверхнормативное отклонение напряжения является следствием нерационального распределения нагрузки между фидерами, отходящими от центра питания, некорректной настройки устройств РПН и ответвлений ПБВ трансформаторов. Выявленная в некоторых точках контроля несимметрия по обратной и нулевой последовательностям обусловлена неравномерным распределением нагрузки по фазам. Превышение нормативных значений коэффициентами гармонических составляющих, кратных трем, связано с повсеместным распространением энергосберегающих ламп и электроприемников на основе преобразователей, а также с высокими значениями сопротивления нулевых проводников.

Полученная в ходе измерений информация о графиках нагрузки отдельных подстанций распределительной сети и исходные данные о сопротивлении элементов позволили составить расчетную модель сети для оценки напряжения в узлах сети. По результатам расчета напряжений был составлен алгоритм выбора оптимальных ответвлений ПБВ трансформаторов и проанализирована необходимость установки вольтодобавочных трансформаторов. Для снижения несимметрии напряжений по обратной последовательности рассмотрена возможность установки симметрирующих устройств. В целях уменьшения коэффициентов гармонических составляющих, кратных трем, и несимметрии по нулевой последовательности проведена оценка эффекта от увеличения сечения нулевых проводников.

### **Литература**

1. **ГОСТ 32144–2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

*А.В. Сопот, студ.; рук. С.А. Акчурина, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ, КАК МЕРА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В связи с постоянным ростом городских нагрузок основной тенденцией в развитии электрических сетей является применение более высоких классов напряжения. Данная мера влечет за собой уменьшение потерь мощности, увеличение пропускной способности линий электропередач [1], уменьшение потребления электроэнергии и уменьшение расхода цветных металлов, поэтому может являться мерой улучшения энергоэффективности городской электрической сети в целом.

В настоящее время отсутствует количественная оценка показателя энергоэффективности городских электрических сетей. Анализ материалов позволяет рассмотреть следующую систему критериев, которые должны учитываться при исследовании интегрального показателя энергоэффективности:

- технические критерии (показатели качества электроэнергии, величина потерь электроэнергии, ущерб от недоотпуска электроэнергии);
- экономические критерии (капиталовложения на строительство линий электропередач, издержки на эксплуатацию и возмещение потерь электроэнергии);
- экологические критерии;
- социальные критерии (уровень подготовки персонала, человеческий фактор, оптимизация рабочих процессов).

Проведена оценка вклада увеличения напряжения в уменьшение дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию городских электрических сетей в виде предварительного технико-экономического сравнительного анализа распределительных сетей города номинальных напряжений 10 и 20 кВ, что является экономическим критерием. Оценка составляющих дисконтированных затрат сети для данных уровней напряжения показала:

- уменьшение сечений кабелей и их количества при повышении напряжения и, как следствие, уменьшение капиталовложений в строительство линий электропередач;
- уменьшение потерь электроэнергии в линиях 20 кВ по сравнению с более низким уровнем напряжения.

В целом дисконтированные затраты на сеть среднего напряжения 20 кВ уменьшились по сравнению с сетью 10 кВ на 35 %.

### **Литература**

1. **Шведов Г.В.** Экономические режимы электрических сетей: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Все промышленные потребители электроэнергии наряду с потреблением активной мощности потребляют и реактивную мощность. Передача реактивной мощности от электростанций к потребителям по электрическим сетям приводит к дополнительным потерям активной мощности [1]. Эти дополнительные потери могут быть уменьшены, если разгрузить сети от передачи реактивной мощности. Этого можно достичь, если источники реактивной мощности мы установим у потребителей электроэнергии.

Наряду с потерями активной мощности реактивная мощность оказывает большое влияние на устойчивость энергетических систем [2].

Проведенные исследования существующих и перспективных источников реактивной мощности для промышленных предприятий с рассмотрением удельных потерь мощности, сравнительных удельных стоимостных характеристик и области их предпочтительного применения позволяют выбирать на первой стадии проектирования оптимальные варианты компенсации реактивной мощности.

В данной работе рассматриваются критерии и методы выбора различных источников реактивной мощности с учетом новых разработок, что дает возможность выбирать оптимальные типы компенсирующих устройств и значительно снизить потери электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий. Для промышленных предприятий с электроприемниками, имеющими нелинейные вольтамперные характеристики, рассмотрена методика расчета компенсации реактивной мощности с применением узкополосных и широкополосных фильтров.

### **Литература**

1. **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009.
2. **Ковалёв И.Н.** Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990.

*А.С. Умрик, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ I КАТЕГОРИИ НАДЕЖНОСТИ ОСОБОЙ ГРУППЫ**

В настоящее время в мире растет доля электроприемников, которые предъявляют повышенные требования к качеству электроэнергии (ЭЭ) и надежности электроснабжения. Для поддержания требуемого уровня надежности электроснабжения особо ответственных потребителей существует множество технических средств и решений, однако их применение в системах электроснабжения (СЭС) требует технико-экономического обоснования (ТЭО). На этапе ТЭО встречается ряд противоречий, возникающих в результате наличия значительного количества ведомственных документов, которые регламентируют построение СЭС, и отсутствия литературы, обобщающей и систематизирующей данную информацию. В связи с этим возникает потребность в едином документе, регламентирующем построение СЭС потребителей I категории особой группы.

Большинство методик, применяемых для формирования СЭС, основываются на требуемой мощности нагрузки. Учитывающая же фактор времени автономной работы методика [1] не учитывает эксплуатационных затрат, что может привести к необоснованному увеличению капиталовложений. Значительно облегчить процесс формирования СЭС позволит совершенствование методики ТЭО. Поэтому основными задачами исследования, проводимого в рамках магистерской работы, является сбор, анализ и обобщение информации, представленной в отечественных и зарубежных регламентирующих документах, а также совершенствование методики [1] для обоснования структуры и состава СЭС потребителей I категории надежности особой группы.

Решение данных задач можно разбить на несколько этапов: анализ источников ЭЭ; анализ преобразовательного и коммутационного оборудования; анализ отечественных и зарубежных регламентирующих документов; обобщение информации в виде учебно-методического пособия; уточнение и совершенствование существующей методики [1].

Полученные результаты могут использоваться для разработки проекта нормативного документа, регламентирующего построение СЭС потребителей I категории надежности особой группы.

### **Литература**

1. **Самойлов В.В.** Методика выбора систем автономного электроснабжения потребителя I категории особой группы: Дис. ... уч. ст. Москва, 2014.

## УЧЕТ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИБЛИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ К ЦЕНТРАМ НАГРУЗОК

Одним из перспективных направлений совершенствования конструктивного устройства трансформаторных подстанций (ТП) является их сооружение в подземном исполнении [1]. Строительство надземных подстанций в городах ограничивается эстетическими, архитектурными и градостроительными требованиями, что, кроме всего прочего, не всегда позволяет расположить подстанцию в центре нагрузки. Подземные подстанции лишены указанных недостатков и могут быть сооружены в непосредственной близости к центру нагрузок.

Приближение ТП к центру ее нагрузки приводит к изменению длины линий 20 и 0,38 кВ. При этом дисконтированные затраты на систему электроснабжения должны учитывать разницу в дисконтированных затратах на кабельные линии рассматриваемого напряжения. На рис. 1 приведены полученные на основе технико-экономического анализа номограммы целесообразности сооружения подземных подстанций в городской электрической сети при различных мощностях подстанции и длинах кабельных линий 0,38 и 20 кВ.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что фактор уменьшения длины кабельных линий 0,38 кВ оказывает большее влияние на целесообразность сооружения подземной подстанции, чем удлинение кабельных линий 20 кВ. Таким образом, учет приближения ТП к центрам нагрузок позволяет расширить зону целесообразности сооружения подземной подстанции.

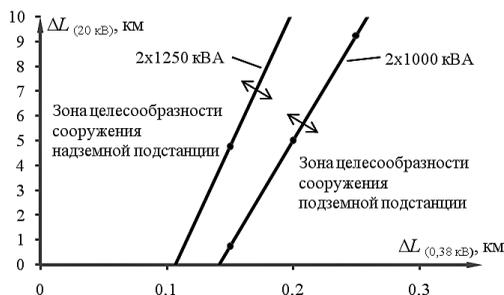


Рис. 1. Номограмма целесообразности сооружения подземной/надземной подстанции:

$\Delta L$  – изменение длины кабельной линии рассматриваемого напряжения.

### Литература

1. Акчурина С.А., Шведов Г.В. Целесообразность сооружения в городах подземных подстанций // Электроэнергия. Передача и распределение. 2013. № 6. Т. 21.

*А.И. Юлдашева, студ.; рук. А.В. Малафеев, к.т.н., доц.  
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*

## **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИТА МОЩНОСТИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СХЕМ КРУПНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Для системы электроснабжения крупного промышленного предприятия характерно наличие сетей напряжением 110–220 кВ и примыкание их к системообразующим сетям. Так, например, система электроснабжения ОАО «ММК» содержит два замкнутых контура указанного класса напряжения, связанных с подстанциями 500 кВ «Магнитогорская» и «Смеловская» МЭС Урала (ОАО «ФСК ЕЭС»), а также с шинами 220 кВ Троицкой ГРЭС. В случае вывода в ремонт оборудования на этих объектах, а также при ремонте линий «Магнитогорская–Смеловская» (220 и 500 кВ), «Троицкая ГРЭС–Магнитогорская» (500 кВ) будет иметь место ослабление связи ПС «Бекетово» – Троицкая ГРЭС. В этом случае часть транзитного перетока передается по замкнутым сетям системы электроснабжения, на которые ложится задача обеспечения системной надежности.

Таким образом, при планировании ремонтных режимов как в сетях энергосистемы, так и в системе электроснабжения такого объекта необходимо учитывать обеспечение заданного перетока мощности с заданным уровнем надежности, для чего необходимо специализированное программное обеспечение. На кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработан алгоритм оценки структурной надежности электроснабжения, реализованный в составе программного комплекса КАТРАН [1]. Алгоритм основан на методе последовательного эквивалентирования и позволяет рассчитывать показатели надежности для выбранного потребителя с учетом того, какие элементы сети участвуют в передаче к нему потока мощности. Для решения поставленной задачи разработаны алгоритм и программный модуль, позволяющие по рассчитанному потокораспределению для двух выбранных на расчетной схеме точек выявлять прохождение потока мощности с выделением соответствующих элементов и для этих элементов определять эквивалентные показатели надежности. С помощью разработанного модуля применительно к сетям Магнитогорского энергетического узла, в том числе ОАО «ММК», выполнена оценка нормальной и ремонтных схем сетей 110–500 кВ по критерию обеспечения надежности транзита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № НК 14-07-00200\14.

### **Литература**

1. **Свидетельство** о гос. регистрации программы для ЭВМ «КАТРАН 7.0» RU 2013616847 / В.А. Игуменшев, А.В. Малафеев, О.В. Газизова и др. Опубли. 20.09.2013, Бюл. № 3.

## Секция 52

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ**

*Председатель секции — зав. каф. Эл. Ст., к.т.н.,  
профессор Ю.П. Гусев*

*Секретарь секции — к.т.н., ассистент А.А. Антонов*

*Г.А. Абдухалилов, асп.; рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ БЛОКИРОВКИ ПО ГЛАВНЫМ СХЕМАМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Одной из существенных задач при проектировании вторичных цепей электроустановок является формирование алгоритмов и цепей оперативной блокировки (ОБ) коммутационных аппаратов (КА). Автоматизация формирования алгоритмов и цепей ОБ в рамках системы автоматизированного проектирования позволит существенно повысить производительность труда проектировщиков.

Основой для цепей ОБ является главная схема распределительных устройств, которая отражает как состав оборудования, так и ее соединение. Имея в базе данных топологию схемы (выводы оборудования и узлы связи), принадлежность КА к определенным распределительным устройствам и присоединениям, можно автоматически формировать цепи ОБ для КА. Цепи ОБ формируются для разъединителей и заземляющих ножей (ЗН). Для разъединителей должны соблюдаться следующие правила составления ОБ [1]:

а) переключения без нагрузки (отключенное положение выключателей (В) или разъединителей);

б) отключенное положение ЗН с двух сторон относительно разъединителя в пределах одного эквипотенциала в каждой стороне.

Для ЗН должны соблюдаться правила составления ОБ: отключение разъединителя со всех сторон, откуда может быть подано напряжение на данный ЗН.

Для хранения информации в базе данных проекта для каждого КА алгоритм блокировки может быть представлен в виде логической формулы. При этом в качестве переменных выступают обозначения аппаратов с признаком включенного или отключенного состояния (например, разъединитель QS1 включен – QS1/I, отключен – QS1/O), а в качестве операций – логические операции И и ИЛИ.

На основе этого логического выражения может быть автоматически построена алгоритмическая схема оперативной блокировки.

#### **Литература**

1. РД 34.35.512–79. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения.

## **ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ДЕЙСТВУЮЩИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ**

Режим изолированной (компенсированной) нейтрали распределительных сетей напряжением 6–10 кВ имеет ряд известных недостатков [1], поэтому некоторые электросетевые компании Центрального региона России планируют изменение режима нейтрали в сети 10 кВ на низкоомное резистивное заземление. Действующие сети 10 кВ являются протяженными и имеют множество поперечных связей, изменение режима нейтрали должно реализовываться поэтапно для каждого относительно электрически обособленного участка сетей. С целью взаиморезервирования должна обеспечиваться связь участков распределительных сетей, имеющих различный режим нейтрали.

В научной работе исследованы аспекты перевода сетей 10 кВ с изолированной нейтралью на режим низкоомного резистивного заземления:

- а) снижение сопротивления заземления подстанций (ПС) 10 / 0,4 кВ;
- б) обеспечение гальванической развязки по токам нулевой последовательности между участками сети с изолированной (компенсированной) нейтралью и участками сети с низкоомным резистивным заземлением;
- в) изменение количества и схемы соединения трансформаторов тока (ТТ) для защиты от однофазных коротких замыканий (КЗ) [2];
- г) применение защиты нулевой последовательности.

Снижение сопротивления заземления ПС может быть обеспечено за счет подключения к заземляющему контуру брони кабелей или усложнения конструкции решетчатого заземляющего устройства. Для гальванической развязки следует применять разделительные трансформаторы со схемой соединения обмоток Д/У0 или Д/Д, не пропускающие токи нулевой последовательности. Для организации релейной защиты от однофазных КЗ рекомендована установка трех ТТ по схеме «полная звезда» или «неполная звезда с ТТ в обратном проводе».

Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для практической реализации изменения режима нейтрали.

### **Литература**

1. **Целебровский Ю.В.** Нормативное обеспечение режима нейтрали в электрических сетях // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. Новосибирск, 2000.
2. **Чернобровов Н.В., Семенов В.А.** Релейная защита энергетических систем: учебное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1998.

*Д.Е. Варганов, студ.; рук. А.В. Кочкина, ст. преп.  
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*

## **ВНУТРИСТАНЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

В системах электроснабжения современных промышленных предприятий наблюдается тенденция увеличения количества собственных источников электрической энергии малой мощности. Данная ситуация обусловлена большим числом факторов, основными из которых являются: а) значительная удаленность предприятий от энергосистемы, что в разы увеличивает стоимость подключения из-за строительства протяженных линий электропередачи; б) наличие вторичных энергоресурсов, что снижает себестоимость электроэнергии и пара, полученных от мини-электростанций; в) ввод в эксплуатацию генераторов малой мощности осуществляется от четырех месяцев до года, что сравнительно невелико относительно крупных электростанций.

Таким образом, на электростанциях с источниками малой генерации встает о вопрос о рациональном использовании покупных и вторичных энергетических ресурсов. Для этой цели на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «МГТУ» им. Г.И. Носова разрабатывается программный комплекс «КАТРАН», позволяющий осуществлять оптимизацию эксплуатационных режимов электростанций с источниками малой генерации в условиях промышленных систем электроснабжения. Основные возможности комплекса в области оптимизации эксплуатационных режимов приведены в [1]. Алгоритм оптимизации основан на сочетании модифицированного метода динамического программирования и последовательного эквивалентирования.

Внедрение разработанного комплекса позволит определять оптимальные режимы по совместной выработке тепловой и электрической энергии на электростанциях, что позволит снизить долю энергозатрат в себестоимости готовой продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № НК 14-07-00200\14.

### **Литература**

1. **Оптимизация** установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, А.В. Кочкина и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013.

## О ВЛИЯНИИ СОСТАВА НАГРУЗКИ ЦЕНТРА ПИТАНИЯ НА НЕСТАБИЛЬНОСТЬ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТОКЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В качестве защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях среднего напряжения 6–10 кВ наиболее широкое применение получили токовые устройства абсолютного замера высших гармоник (ВГ). Селективность такой защиты определяется нестабильностью уровня ВГ в токе ОЗЗ, характеризуемой параметром

$$Z = \alpha_{\text{макс}}/\alpha_{\text{мин}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{макс}}$ ,  $\alpha_{\text{мин}}$  – соответственно максимально и минимально возможный уровень ВГ в собственном емкостном токе  $i$ -го присоединения контролируемой сети.

Нестабильность уровня ВГ в конкретной сети зависит от множества факторов, главными из которых являются состав и режимы работы источников ВГ комплексной нагрузки центра питания (ЦП). Основным источником ВГ в кабельных сетях 6–10 кВ является нелинейная нагрузка (НН): управляемые и неуправляемые вентиляльные преобразователи, электро-термические установки, электросварочные установки, а при их отсутствии (например, при отключении) – трансформаторы 6–10/0,4 кВ. Наличие указанных источников ВГ характерно для кабельных сетей систем электроснабжения промышленных предприятий, где доля НН в составе нагрузки ЦП составляет ~15–90 % [1]. Большие колебания уровня гармоник в течение суток и недели следует ожидать на предприятиях, работающих в сменах с выходным днем (черная металлургия, автомобилестроение и др.), когда возможно значительное уменьшение общей нагрузки, сопровождаемое частичным или полным отключением основных источников ВГ.

Оценки нестабильности уровня ВГ, полученные на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения, показали, что величина параметра  $Z \cong 5 \div 6$ . При такой нестабильности ВГ токовые защиты абсолютного замера гармоник могут быть использованы только на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает ~5 %  $I_{CS}$ . Доля таких присоединений в кабельных сетях среднего напряжения ~50÷60 %. Поэтому более перспективным представляется применение в рассматриваемых сетях защит от ОЗЗ, селективность которых не зависит от нестабильности ВГ.

### Литература

1. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М.: НЦ ЭНАС, 2002.

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Одним из основных критериев технического состояния аккумуляторных батарей (АБ) систем оперативного постоянного тока энергообъектов является их фактическая емкость. Установление этого параметра – задача далеко не из простых. На сегодняшний день единственным совершенно точным и полным методом измерения остаточной емкости АБ является контрольно-тренировочный цикл, являющийся наиболее трудоемким и затратным по времени. Данные исследований [1] указывают на связь между величиной внутреннего сопротивления АБ переменному току  $Z$  и его остаточной емкостью  $Q$ . Однако по ряду причин между остаточной емкостью АБ и величиной их внутреннего сопротивления переменному току нет однозначной зависимости. Измерения внутреннего сопротивления АБ на переменном токе показывают, что оно сильно зависит от частоты и имеет явно выраженный минимум при частотах порядка сотен герц (рис. 1, а). Кроме того, по мере уменьшения емкости АБ наблюдается смещение частоты минимума внутреннего сопротивления  $\Delta f_M$  в сторону высоких частот, показывая высокий уровень корреляции между ними.

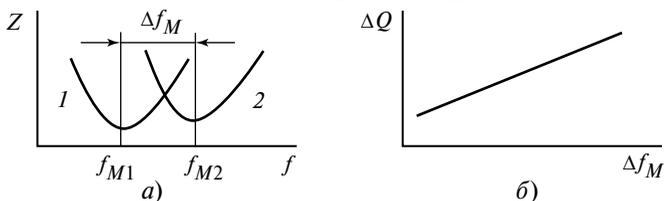


Рис. 1. Зависимости внутреннего сопротивления АБ от частоты (а) и градуировочная характеристика (б)

Выявленные закономерности позволили предложить новый способ определения остаточной емкости АБ, заключающийся в том, что определяют эталонное значение частоты минимума внутреннего сопротивления  $f_{M1}$ , соответствующее новой АБ (на рис. 1, а – кривая 1), значение частоты минимума внутреннего сопротивления для контролируемой АБ  $f_{M2}$  (на рис. 1, а – кривая 2), находят разность упомянутых значений частот  $\Delta f_M$  и по градуировочной характеристике (рис. 1, б) устанавливают процент утраченной емкости АБ  $\Delta Q$ .

### Литература

1. Гусев Ю.П. Аккумуляторные батареи для систем оперативного постоянного тока для подстанций ЕНЭС // Энергоэксперт. 2009. № 4.

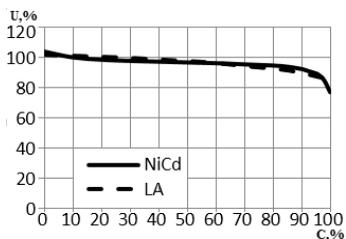
## **О ПРИМЕНЕНИИ НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДСТАНЦИЙ**

Традиционно в системах оперативного постоянного тока (СОПТ) в качестве аккумуляторных установок используются стационарные свинцово-кислотные аккумуляторы. Преимущественное применение свинцово-кислотных аккумуляторов объясняется целым рядом их достоинств. В то же время на рынке представлены и другие типы аккумуляторных батарей. Одними из таких являются никель-кадмиевые аккумуляторы, которые имеют широкий диапазон рабочих температур, сопоставимое со свинцово-кислотными аккумуляторами, внутреннее сопротивление, неприхотливость к условиям заряда, низкую стоимость, приведенную к одному году эксплуатации. Актуальным представляется анализ возможности применения никель-кадмиевых аккумуляторов в СОПТ подстанций.

В работе проведено изучение и сопоставление разрядных характеристик свинцово-кислотных и никель-кадмиевых аккумуляторов. Учитывались особенности области применения: расчетная продолжительность разряда, наличие импульсных и постоянных нагрузок в СОПТ, влияние отклонений рабочих температур, среднее количество циклов заряда-разряда за срок службы аккумулятора, требования эксплуатационной документации, регламентирующей порядок проведения периодических испытаний аккумуляторных батарей, допустимые предельные отклонения напряжения на зажимах электроприемников в СОПТ и применяемые схемные решения подключения нагрузки СОПТ к источникам электроэнергии.

Одним из результатов исследования является значение расчетной критической глубины разряда аккумулятора, после которой никель-кадмиевая технология становится предпочтительнее свинцово-кислотной из-за разницы в разрядных характеристиках (рис. 1).

Результаты исследования будут использованы специалистами отрасли для проведения объективного сопоставления аккумуляторных технологий и принятия обоснованных решений при проектировании и реконструкции СОПТ.



**Рис. 1. Разрядные характеристики аккумуляторов**

*И.А. Евсюков, асп.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГБЛОКА ПГУ ПРИ МГНОВЕННОМ СБРОСЕ НАГРУЗКИ**

Удержание энергоблоком на базе парогазовой установки (ПГУ) нагрузок собственных нужд (СН) при аварийных отключениях от сети является актуальной проблемой, решение которой повышает надежность оборудования в аварийных режимах, а также оперативное включение энергоблока в сеть после ликвидации причины аварии. В современных условиях эксплуатации энергосистем существует множество причин возникновения аварийных ситуаций, приводящих к погашению ТЭС без сохранения собственных нужд. Поэтому в настоящее время на нововведенных блоках ПГУ и газотурбинных установок (ГТУ) проводятся динамические испытания по мгновенным сбросам нагрузки с удержанием нагрузки СН газовой турбинами.

Одним из примеров проведения таких испытаний является Блок № 2 Калининградской ТЭЦ-2, на котором с целью обеспечения устойчивой работы газовых турбин и блока в целом при режимах сброса нагрузки и первичного регулирования частоты выполнялись изменения в алгоритмах и настроечных параметрах программного обеспечения электрической части системы регулирования (ЭЧСР). Проведение опытов на оборудовании выявило основную причину отключений газовых турбин – погасание факела, которая была устранена поиском достаточной величины открытия регулирующего клапана. Также успешно проведенные испытания на блоке ПГУ-450 МВт Блока № 2 КТЭЦ-2 при режимах регулирования мощности с частотной коррекцией показали возможность регулирования газовой турбины ГТЭ-160 к изменению градиента мощности до 109,5 МВт/мин.

Приведенный выше пример доказывает необходимость разработки рекомендаций повышения надежности и живучести электростанций с ПГУ при режимах сброса нагрузки энергоблока не только на питание СН электростанции, но и при питании местной нагрузки на генераторном напряжении. Решение данной задачи может осуществляться путем разработки математической модели энергоблока, автономной системы, созданной выделением энергоблока ПГУ для электроснабжения СН и местной нагрузки. В работе описывается разработанная модель для исследования режимов при мгновенном сбросе нагрузки энергоблоком до мощности СН и местной нагрузки.

*А.В. Ерошенко, асп.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В САПР СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ**

Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) требует ускорения проектирования и повышения качества подготовки рабочей документации подстанций и, в том числе, их собственных нужд (СН). В России и за рубежом разрабатываются системы автоматизированного проектирования (САПР), позволяющие решить эту задачу. Современные САПР нуждаются в унифицированном описании объектов СН подстанции и в обмене разработанными моделями объектов между различными САПР на базе международных стандартов IEC (CIM) [1], чем обусловлена актуальность разработки унифицированных информационных моделей для проектирования собственных нужд подстанций.

В докладе рассматривается применение в САПР подстанций разработанных автором информационных моделей и исследуются методы автоматизации создания рабочих документов проекта на основе CIM-моделей.

Новизна проводимых исследований заключается в подготовке алгоритмов проектирования СН подстанций в соответствии с методологией CIM IEC стандартов на основе отечественного опыта проектирования подстанций.

Подготовлена реализация библиотеки классов стандарта IEC 61970 CIM в виде конечной системной утилиты, позволяющей интегрироваться в сторонние приложения. Формализованы инвариантные и объектные проектные процедуры программного комплекса. Проектируется и наполняется база данных для разрабатываемой САПР.

Разрабатываемая система позволит повысить эффективность процесса проектирования собственных нужд подстанции и наладить унифицированный обмен между программными комплексами – как зарубежными, так и национальными. Разработанная информационная модель собственных нужд подстанций будет использоваться при разработке САПР подстанций.

### **Литература**

1. IEC 61970–301. Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 301: Common Information Model (CIM) Base // International Electrotechnical Commission, 2003.

*Д.А. Калашников, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **АВАРИЙНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ БЛОКА ПГУ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И МЕСТНОЙ НАГРУЗКИ**

В настоящее время для повышения надежности электростанции применяются два способа практической реализации аварийных источников мощности (АИМ), а именно: в виде автономных генерирующих установок (дизель-генераторов, газотурбинных установок и др.) и штатных генераторов электростанций с предусмотренными схемами частотно-делительной автоматики [1]. Эти два способа обладают определенными недостатками: высокой стоимостью и длительным временем пуска автономных генераторов у первого способа и обесточиванием с потерей большинства потребителей собственных нужд у второго способа. В этой связи актуальной проблемой является поиск новых способов создания АИМ.

В работе рассматривается новый способ реализации АИМ [2], который заключается в автоматическом отключении от сети электростанции и создании на ней автономной системы, потребителями в которой являются собственные нужды всех энергоблоков, а также местная нагрузка на генераторном напряжении. Источником энергии служит один или несколько не отключенных генераторов газотурбинной установки в составе энергоблока парогазовой установки, обладающих высокой мобильностью и широким диапазоном регулирования мощности.

При объединении потребителей собственных нужд энергоблоков электростанции и местной нагрузки с помощью резервной магистрали возникает проблема необходимости оценки уровня тока при коротких замыканиях в автономной системе.

Для исследования проблемы в системе MatLab разработана модель автономной системы, позволяющая проведение указанных выше расчетов с целью получения рекомендаций по реализации и эксплуатации этого способа.

### **Литература**

1. Александров А.С., Жуков В.В., Кузьмичёв В.А. Повышение надежности электроснабжения районных тепловых станций с помощью газотурбинных установок // Промышленная энергетика. 2013. № 3.
2. **Автоматическое** выделение собственных нужд ТЭС при аварийных изменениях частоты и напряжения в сети / В.С. Буртаков, Л.Н. Касьянов и др. // Электрические станции. 2012. № 9.

## ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО РАСЧЕТУ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Электронные мультимедийные технологии предоставляют широкие возможности по повышению эффективности учебного процесса. В НИУ «МЭИ» активно внедряются электронные учебно-методические комплексы, электронные презентации стали неотъемлемым атрибутом лекционных занятий. Несмотря на это практические занятия в большинстве случаев, проводятся традиционно – мелом по доске. Причина заключается в специфике практических занятий, предполагающих активное вовлечение студентов в расчеты и обсуждение результатов, а значит, интерактивность подачи материала и разнообразие сценариев проведения занятий. В связи с этим актуальным представляется разработка мультимедийных электронных вспомогательных материалов для проведения практических занятий путем поиска и адаптации электронных технологий с учетом специфики курса по расчету коротких замыканий (КЗ).

В результате анализа программных средств с позиции технических возможностей программы, удобства ее применения и стоимости в качестве основного средства разработки был выбран *Adobe Acrobat*, имеющий встроенный язык программирования *JavaScript* и бесплатный браузер *Adobe Acrobat Reader* [1]. Основной составляющей электронного вспомогательного материала является интерактивная форма для ведения занятия, призванная заменить традиционную доску. Расчетные схемы, исходные данные и задания на расчет подаются в виде презентационного материала в первом блоке. Предусмотрена краткая анимированная теоретическая справка, поясняющая цели расчета, решаемые задачи и иллюстрирующая возникновение и изменение составляющих тока КЗ во времени. Расчетная часть вспомогательного материала состоит из совокупности полей для ввода параметров элементов схемы или, рассчитанных на предыдущих шагах, параметров схемы замещения. Автоматизированы простейшие арифметические вычисления [2].

Разрабатываемый электронный вспомогательный материал будет востребован при проведении практических занятий по расчету КЗ.

### Литература

1. Мельников Ю.Б., Тропин А.В. Выбор формата представления презентаций учебного назначения // Ярославский педагогический вестник. 2009. № 1.
2. **Руководство** по Adobe Acrobat [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://helpx.adobe.com/ru/acrobat.html>, свободный.

*В.Д. Кузнецов, асп.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **КООРДИНАЦИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КЗ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Реформирование российской электроэнергетики привело к тому, что многие промышленные предприятия стремятся стать независимыми по электроснабжению, что привело к строительству отдельных независимых от энергосистемы источников электроснабжения – газопоршневых электростанций (ГПЭС). В этой связи актуальна проблема координации уровней токов короткого замыкания (ТКЗ) в схемах электроснабжения после подключения к ним газопоршневых установок (ГПУ).

В работе представлена разработка алгоритма и программы расчетов по координации уровней ТКЗ, т. е. согласованию их с параметрами установленного электрооборудования. Алгоритм предусматривает следующие этапы:

- определение и оценка критических параметров установленного электрооборудования в схеме до подключения ГПЭС;
- определение мощности, необходимой для электроснабжения потребителей предприятия;
- определение количества, типов, параметров и единичной мощности генераторов ГПУ;
- разработка вариантов подключения генераторов ГПЭС к схеме электроснабжения предприятия;
- расчет ТКЗ в схеме электроснабжения после установки ГПЭС;
- координация уровней ТКЗ в схеме электроснабжения путем выбора одного из способов их ограничения и согласования параметров электрооборудования.

В качестве примера было рассмотрено создание ГПЭС для электроснабжения действующего газоперерабатывающего комплекса (ГПК). Электроснабжение ГПК осуществляется от подстанции 110 кВ через понижающие трансформаторы.

Для повышения надежности электроснабжения ГПК предполагается строительство внутривозводской ГПЭС, состоящей из трех ГПУ мощностью по 18,3 МВт. В процессе расчета выбрано два варианта подключения ГПУ: 1) подключение к имеющимся трансформаторам собственных нужд на ГПП-6 и ГПП-4 сети электроснабжения; 2) подключение через новый трансформатор напряжением 110 кВ с тремя обмотками НН напряжением 10,5 кВ и мощностью 80 МВА. Результаты расчетов показали, что подключение ГПЭС к трансформатору с расщепленной обмоткой является наиболее приемлемым вариантом.

Н.А. Лагутин, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ВЫБОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СТАТОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Во избежание перегрева и выхода из строя гидрогенератора необходимо на стадии проектирования и эксплуатации рассчитывать и контролировать превышение температуры обмотки и магнитопровода статора над температурой охлаждающего агента (в большинстве случаев – воздуха). При расчете нагревания обмотки статора генератора практикуется использование двух расчетных методик [1, 2].

В [1] расчет строится на предположении, что при высокой теплопроводности медных проводников обмотки и стального сердечника на протяжении одного пакетного деления, превышения температуры обмотки и сердечника над температурой входящего газа одинаковы в любой точке. Далее проводится расчет тепловых сопротивлений.

В методике [2] принято, что превышения температуры медной обмотки статора не одинаковы, поэтому превышения температур пазовой и лобовой частей обмотки статора различны и учитываются через коэффициенты теплоотдачи.

Выполнен анализ и сравнение методик для гидрогенераторов различной мощности. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты сравнения для гидрогенератора типа СВ-1343/140-96 УХЛ4 мощностью 65 МВт (табл. 1).

Таблица 1

**Сравнение результатов расчета превышения температур обмотки  
и сердечника статора с опытными данными**

	[1]	Отклонение от опыта	[2]	Отклонение от опыта	Экспериментальное определение превышения температуры
Обмотка статора	51,4 °С	25,5 %	46,2 °С	12,8 %	41 °С
Сталь статора	31,8 °С	16,3 %	41,4 °С	9,0 %	38 °С

На основании приведенных в таблице относительных отклонений результатов расчета от экспериментальных данных можно утверждать, что методика [2] является более точной и, следовательно, наиболее приемлемой для выполнения расчетов.

### Литература

1. **Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.** Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. М.: Высшая школа, 2001.
2. **Пинский Г.Б., Домбровский В.В.** Расчет явнополюсных синхронных машин. Л.: Энергоатомиздат, ЛО, 1984.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

Системы бесперебойного электропитания широко применяются в системах собственных нужд электростанций и подстанций, объектах инфраструктуры связи, на производственных предприятиях со сложным конвейерным технологическим циклом. Отказы в системе электропитания приводят к человеческим жертвам, экологическим катастрофам и выходу из строя дорогостоящего оборудования. При близких коротких замыканиях (КЗ) в сети надежного питания современные инверторы с широтно-импульсной модуляцией могут вызвать искажение синусоидальности выходного тока. Наличие высших гармоник в токе может вызвать преждевременное срабатывание расцепителей мгновенного действия и несрабатывание тепловых расцепителей автоматических выключателей (АВ) [1, 2]. Корректировка токов срабатывания расцепителей АВ с учетом ожидаемого коэффициента несинусоидальности тока КЗ позволяет повысить надежность токовых защит и систем бесперебойного питания в целом.

Целью исследования является разработка рекомендаций по расчету токов срабатывания АВ с учетом несинусоидальности тока КЗ путем изучения влияния токов высших гармоник на расцепители АВ разных типов.

На основе анализа конструкций применяемых расцепителей в АВ и физических процессов при отключении КЗ авторами разработана математическая модель переходных процессов в расцепителях при протекании по ним несинусоидальных сверхтоков. Проводится анализ основных методов обеспечения селективности, определяется возможность использования интеграла Джоуля для организации селективной работы защит в цепях с несинусоидальными токами [3].

Результаты исследования в виде рекомендаций по учету несинусоидальности тока при выборе тока срабатывания АВ будут использованы при разработке проектной документации электроустановок, в ходе выполнения наладочных работ и эксплуатации электроустановок.

### Литература

1. **Mitsubishi** electric. Technical notes. 2013.
2. **Siemens**. Harmonics in power systems. Causes, effects and control. 2013.
3. **Ивашенко В.С.** Методы повышения селективности низковольтных автоматических выключателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010.

Я.В. Пищиков, студ.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ПАРАМЕТРЫ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ

Защита от сверхтоков в системах оперативного постоянного тока (СОПТ) современных подстанций должна строиться по трехуровневой системе и удовлетворять требованиям чувствительности в основной и резервных зонах, должна быть селективной и обладать быстродействием, соответствующим требованиям электромагнитной совместимости микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики [1].

Известные методики расчета коротких замыканий не обеспечивают комплексность учета этих требований, не учитывают «тепловой спад» тока короткого замыкания (КЗ), нелинейное сопротивление электрической дуги, подпитку от зарядных устройств и токоограничивающее действие отключающих защитных аппаратов [2].

В данной работе представлены результаты расчетно-теоретического анализа процессов короткого замыкания, проведенного с помощью математической модели [3] в системе MathCAD. Определены ограничения на длины и сечения кабельных связей между щитом постоянного тока, шкафами распределения оперативного тока и конечными электроприемниками СОПТ, обусловленные нормированными по стандартам международной электротехнической комиссии времятоковыми характеристиками «В», «С» и «D» автоматических выключателей, а также время-токовыми характеристиками «gG/gL» плавких предохранителей. Получены данные, позволяющие обоснованно формулировать расчетные условия при расчете коротких замыканий в СОПТ.

Результаты исследования будут использованы при разработке новых стандартов ОАО «РЖД» и ОАО «ФСК ЕЭС».

### Литература

1. **СТО 56947007-29.120.40.041–2010.** Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».
2. **Гусев Ю.П.** СОПТ. Автоматические выключатели и плавкие предохранители // Энергоэксперт. 2009. № 2.
3. **Борисова Е.С., Гусев Ю.П.** Защита систем оперативного постоянного тока от коротких замыканий // Энергетика: управление, качество и эффективность использования ресурсов: Труды четвертой Всероссийской научно-технич. конф. с международным участием. 5–6 октября 2005 г. В 2 т. Благовещенск, 2005.

*О.И. Плужников, студ.; рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИЗУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНЫХ БЛОКИРОВОК В СООТВЕТСТВИИ СО СТАНДАРТОМ МЭК 61850**

В настоящее время при создании автоматизированных систем управления электротехническим оборудованием (АСУ ЭТО) применяются логические реализации оперативных блокировок в виде специальных программных связей между соответствующими компонентами. Данные блокировки предназначены для исключения ошибочных действий при работе персонала с коммутационным оборудованием.

Целью данной работы является изучение информационного обмена между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) при реализации оперативных блокировок в рамках системы управления присоединениями 110 кВ, построенной в соответствии со стандартом МЭК 61850 на базе специализированного полигона АСУ ЭТО кафедры «Электрические станции». В качестве средства обеспечения данного однорангового обмена информацией о состоянии первичных цепей между терминалами стандартом МЭК 61850 предусмотрен GOOSE-сервис, который представляет собой специализированное программное средство для мультикастовой передачи сообщений [1].

Для того чтобы зафиксировать этот GOOSE-трафик, была применена специальная программа-сниффер «WireShark», с помощью которой был осуществлен мониторинг GOOSE-трафика как в нормальном режиме работы присоединений 110 кВ, так и в условиях коммутаций. Было установлено, что при коммутациях интенсивность отправки GOOSE-сообщений резко возрастает и впоследствии постепенно снижается до значений установившегося режима. Затем, на основании полученных результатов, была описана структура GOOSE-сообщения, в том числе и в контексте соответствующего SCD-файла.

Результаты данной работы могут быть использованы при создании учебно-методических материалов по данной тематике.

### **Литература**

1. **Трофимов А.В., Поляков А.М.** Основы организации микропроцессорных автоматизированных систем управления технологическими процессами электростановок. М.: МЭИ, 2014.

*А.А. Рабышев, студ.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В настоящее время в России широко применяется электрооборудование, изготовленное по стандартам МЭК. Несмотря на это при проектировании электроустановок используются методики выбора электрооборудования, разработанные на основе старых ГОСТов [1]. В частности, при выборе автоматических выключателей не учитывается специфика современных времятоковых защитных характеристик (ВТХ). Это может приводить к неправильной оценке чувствительности, селективности, термической стойкости и невозгораемости кабельных линий.

Использование стандартов МЭК при выборе автоматических выключателей электроустановок собственных нужд электростанций и подстанций затруднено из-за особенностей отечественных типовых проектных решений и отраслевых требований, таких как использование линий длиной 800 и более метров и необходимости проверки кабелей по условиям невозгораемости при отключении КЗ резервной защитой. Еще одной проблемой является существование нескольких противоречивых подходов к выбору расчетной точки короткого замыкания для проверки кабелей на термическую стойкость и невозгораемость [2].

Автором в программной среде MathCAD была разработана математическая модель процесса короткого замыкания, позволяющая учесть влияние на работу автоматических выключателей с ВТХ, соответствующими стандартам МЭК, таких факторов, как изменение активного сопротивления проводников при коротком замыкании вследствие их нагрева, теплоотдача в окружающую среду, сопротивление дуги в месте КЗ [3]. Учет этих факторов может обеспечить правильный выбор защитных аппаратов.

Предлагается создать методику выбора автоматических выключателей для системы собственных нужд, соответствующую современным требованиям отечественных и международных нормативных документов.

### **Литература**

1. **ГОСТ 30323–95.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания.
2. **Циркуляр № Ц-2-98 [Э]** о проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока КЗ.
3. **Расчет** коротких замыканий и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

*П.В. Субботин, студ.; рук. А.М. Поляков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ»**

Виртуальные лабораторные работы, связанные с эксплуатационными режимами и методами испытаний электрооборудования, разработаны для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и изучающих курс «Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций».

Примерами являются следующие лабораторные работы:

1. Тепловые режимы работы трансформаторов. Направлена на получение представления об эксплуатационных режимах работы силовых трансформаторов, определяющих сроки их службы, и приобретение практических навыков моделирования теплового переходного процесса в наиболее нагретой точке в соответствии со стандартом [1].

2. Экспериментальное определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей. Направлена на ознакомление с натурными испытаниями, которые проводятся при эксплуатации оборудования на различных энергообъектах [2].

В перспективе планируется расширить список работ для полного перехода к виртуальным лабораториям.

В ходе лабораторных работ студенты научатся: создавать и параметризовать модели электроустановок; собирать электрические схемы опытов, состоящих из источников питания, различных измерительных приборов и непосредственно моделей изучаемого оборудования; рассчитывать и анализировать электрические характеристики и режимы работы электроустановок; обрабатывать полученные экспериментальные данные.

Процесс выполнения данных виртуальных лабораторных работ максимально приближен к работе с реальной электроустановкой, поэтому в результате студенты приобретут практические умения и навыки инженерной работы в области эксплуатации электрооборудования.

### **Литература**

1. **ИЕС 60076-7**. Трансформаторы силовые. Часть 7. Руководство по нагрузке масляных силовых трансформаторов.

2. **ГОСТ 7217-87**. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.

*В.А. Трофимов, асп.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Короткие замыкания (КЗ), неизбежно возникающие в распределительных сетях, приводят к кратковременным провалам напряжения, нарушающим нормальный режим работы асинхронных двигателей (АД). Продолжительность провалов напряжения зависит от времени срабатывания максимальной токовой защиты. В настоящее время с целью снижения времени отключения КЗ в распределительных сетях активно внедряются микропроцессорные терминалы защит [1], в которые заложен ряд зависимых времятоковых характеристик (ВТХ) срабатывания, соответствующих стандартам IEC 60255-3 [2] и IEEE Std C37.112 [3]. В связи с этим актуальной задачей является анализ процессов выбега и самозапуска АД при локализации КЗ защитами с различными ВТХ.

Для исследования переходных процессов при КЗ и самозапуске АД в программном комплексе NEPLAN была разработана расчетная модель участка распределительной сети. Модель включала в себя информацию о первичном оборудовании и параметры РЗ.

В результате моделирования были получены осциллограммы переходных процессов, вызванных трехфазными и двухфазными КЗ, для различных сопротивлений системы и удаленности точки КЗ, при использовании нормально инверсных, сильно инверсных, чрезвычайно инверсных, а также независимых ВТХ защит. Установлено, что при использовании инверсных ВТХ и высоком сопротивлении системы возможна продолжительная работа двигателей при пониженном напряжении, что приводит к повышению тока статора и может вызвать отключение АД тепловыми защитами.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методических указаний по выбору структуры распределительных сетей и характеристик максимальных токовых защит. Применение результатов исследования позволит снизить негативные последствия от коротких замыканий.

### **Литература**

1. **Положение** ОАО «РОССЕТИ» о единой технической политике в электросетевом комплексе, 2013.
2. **IEC 60255-3**. Electrical relays/ part 3: single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time.
3. **ANSI/IEEE C 37.112 Standard Inverse-Time Characteristic for Overcurrent Relays**.

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

В условиях рыночных отношений в электроэнергетике питающие подстанции (110 кВ и выше) и распределительные сети (35 кВ и ниже) принадлежат различным хозяйствующим субъектам. Взаимодействие по техническим вопросам между собственниками смежных сетей может быть затруднено или отсутствовать, в этой ситуации расчет токов короткого замыкания (КЗ) в распределительных сетях ведется на основе неактуальных (прошлогодных) однолинейных схем и каталожных параметров электрооборудования питающих сетей. В справочниках и каталогах, как правило, отсутствуют параметры вольтодобавочных и линейных регулировочных трансформаторов (*далее* – регулировочных трансформаторов), устанавливаемых на стороне низшего напряжения 6–35 кВ автотрансформаторов: а) напряжение КЗ, б) схема и группа соединения обмоток, в) значение и число ступеней регулирования напряжения. В условиях недостатка справочных данных расчеты КЗ зачастую выполняют по приближенным параметрам, что влияет на точность результатов токов КЗ.

В данной научной работе для регулировочных трансформаторов выполнены следующие задачи:

а) анализ видов трансформаторов, установленных в действующих сетях, по месту установки, способу регулирования напряжения и видам схем замещения прямой и нулевой последовательностей;

б) поиск источников каталожных параметров, необходимых для расчета КЗ, систематизация параметров;

в) оценка погрешности в случае определения токов КЗ по приближенным каталожным данным;

г) оценка возможности использования регулировочных трансформаторов в качестве средства ограничения токов КЗ в распределительных сетях.

Собрана и проанализирована информация о видах эксплуатирующихся регулировочных трансформаторов, для распространенных типов представлены каталожные данные. Серия расчетов, выполненных в программе NEPLAN, показала, что при расчете токов КЗ по приближенным данным погрешность может превышать 10 %. Определены сопротивления питающей сети и автотрансформаторов, при которых регулировочные трансформаторы могут выступать как средства ограничения токов КЗ.

Полученные результаты могут быть востребованы в подразделениях релейной защиты распределительных электрических сетей 6–35 кВ.

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Председатель секции — к.т.н., доцент Т.А. Шестопалова  
Секретарь секции — зав. учебной лабораторией Д.Н. Кунакин

А.А. Аракчеева, студ.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

### ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ДОМА В ПОДМОСКОВЬЕ НА БАЗЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Потребитель представляет собой жилой дом с двумя этажами общей площадью 181 м<sup>2</sup> (см. рис. 1). Количество проживающих человек: 4. Географическое расположение: Российская Федерация, Московская обл., д. Подрезово ( $\varphi = 37,71^\circ$ ;  $\Psi = 55,97^\circ$ , высота над уровнем моря 164 м).

Электроснабжение осуществляется от местной электросети, а установка солнечных батарей позволяет снизить нагрузку на сеть.

Сравнение прихода солнечной радиации в зависимости от угла наклона приемной площадки солнечных модулей (СМ) (рассматривался вариант при оптимальном угле наклона и под углом наклона ската крыши) и различной их ориентации по сторонам света (один скат на юго-восток, а другой на северо-запад) демонстрирует, что наиболее целесообразной является установка СМ на юго-восточный скат крыши под углом равным  $42^\circ$ .

Расчеты показали, что максимальное число СМ PSM4 150, которое можно разместить на крыше, равно 75. Их годовая выработка составляет 12,4 МВт·ч/год. Так как в летние месяцы выработка солнечных батарей максимальна и превышает необходимую величину (излишки электроэнергии не аккумулируются, а отдаются в сеть), то принято решение использовать для охлаждения помещений кондиционер.

Теплоснабжение и потребности горячего водоснабжения обеспечиваются за счет теплонасосной установки (ТНУ), работающей по схеме «грунт-вода». Отбор тепла осуществляется с помощью трех скважинных зондов глубиной по 70 м каждый. ТНУ нагревает воду до  $55^\circ\text{C}$ . Предусмотрен резервный бак-

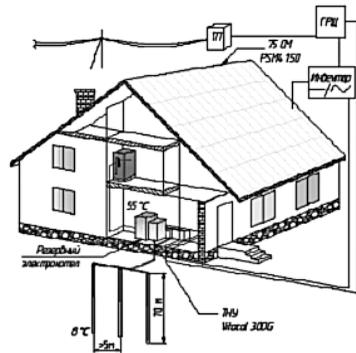


Рис. 1. План энергообеспечения дома

накопитель объемом 10–20 л на 1 кВт мощности теплового насоса, на случай отключения электроэнергии, и электродкотел, чтобы в случае низких температур обеспечить дом теплом.

Все расчеты проводились для реально существующего дома, при строительстве которого использовались обычные строительные материалы (стены кирпичной кладкой, утеплитель из минеральной ваты). При использовании энергосберегающих технологий мощность ТНУ, а следовательно, и потребляемая электрическая энергия, может быть существенно снижена.

*Е.А. Булычева, Е.М. Петухова, студенты;  
рук. О.А. Фролков, дир. Инженерного центра  
(филиал МЭИ в г. Смоленске)*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УНЛК КАК ШАГ К ВНЕДРЕНИЮ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года предусматривает широкое использование возобновляемых источниках энергии [1]. Внедрение альтернативной энергетики особенно привлекательно для труднодоступных и отдаленных от электрических сетей районов, для временного электроснабжения сельскохозяйственных, туристических, научно-исследовательских и прочих объектов. Использование возобновляемых источников для конкретных географических условий регионов России требует создания интеллектуальных энергосистем, позволяющих осуществлять не только телеметрию, анализ аварийных режимов, но и мониторинг внешних условий, количества вырабатываемой энергии разными альтернативными источниками.

Учебно-научный лабораторный комплекс (УНЛК) альтернативной энергетики, установленный в инженерном центре СФ МЭИ, состоит из солнечных батарей ( $16 \times 240$  Вт), ветрогенератора (3 кВт) с анемометром, блока аккумуляторов ( $8 \times 200$  А/ч), дизельного генератора, инвертора и имитатора солнечных батарей (ИСБ).

Для интеллектуального управления УНЛК специально разработана программа, реализованная на основе промышленно-применяемой системе MasterSCADA, свойствами которой являются модульность, масштабируемость и объектный подход к разработке. Программа позволяет осуществлять сбор, архивирование и отображение статистических данных за любой промежуток времени, обеспечивает поддержание уровня заряда накопительных аккумуляторов на уровне не ниже 75 % с учетом прогнозируемой мощности от источников альтернативной энергии, запуск и остановка дизель-генератора при недостаточной мощности альтернативных источников энергии, удаленный доступ к данным минимум для 8 клиентов.

Наличие ИСБ, управляемого компьютером, позволяет воспроизводить ВАХ любых СБ мощностью от 20 Вт до 1 кВт, а также имитировать влияние на них внешних факторов (старение, освещенность, климатические осадки и т.д.), что позволяет обеспечить анализ солнечных энергосистем по изучению характеристик СБ без финансовых затрат и независимо от внешних условий.

### **Литература**

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 года. URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostategy/>

*А.Б. Васенин, асп. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева);  
рук. О.В. Крюков, к.т.н., доц., гл. спец.  
(ОАО «Гипрогазцентр», г. Н. Новгород)*

## **ИНВАРИАНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ**

Развитие новой аппаратной базы электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники стимулирует создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1]. Сегодня к возобновляемым автономным источникам энергии (АИЭ) на базе ВЭУ предъявляются все более высокие требования по обеспечению надежности и энергоэффективности работы, особенно для объектов повышенной опасности [2]. Типовые решения автономных систем электроснабжения (СЭС) с ВЭУ реализуют только частные задачи, не обеспечивая комплекса проблем создания конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения на основе принципов активно-адаптивных «разумных» электросетей.

В общем случае при автономной работе СЭС с различными потребителями электроэнергии на нее воздействуют с разной степенью интенсивности сразу несколько внешних возмущений стохастического и детерминированного характера: технологические (ветровой поток, режимы работы традиционных источников энергии, график потребления) и природные (температура, природные возмущения).

Эффективная система ВЭУ, работающая при стохастическом изменении параметров энергоносителя, должна использовать аппарат теории планирования эксперимента, позволяющий вырабатывать максимальную мощность в режиме рабочих ветров и номинальную – в режиме ограничения. Для этого решены следующие задачи:

- рассмотрены варианты САР мощности ВЭУ с учетом их ресурса;
- сопоставлена совместимость «плавного – жесткого» регулирования;
- разработаны модели регуляторов с инвариантными алгоритмами;
- разработана инвариантная по мощности система автономных ВЭУ;
- сопоставлены данные анализа компьютерного моделирования.

Результаты исследования работы инвариантных систем ВЭУ:

- повышается мощность ВЭУ в режиме рабочих ветров до 5–7 %;
- строгая стабилизация мощности ВЭУ в режиме ограничения;
- эффективное регулирование ВЭУ во всем диапазоне ветров 5÷12 м/с.

### **Литература**

1. **Крюков О.В., Васенин А.Б.** Функциональные возможности ВЭУ при питании объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 2.
2. **Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В.** Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // Труды VIII МНТК АЭП-2014. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2014. Т. 2.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**

Эффективность работы энергокомплексов, в составе которых имеются солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ), во многом определяется параметрами системы ориентации СФЭУ на Солнце. Только благодаря ориентированию СФЭУ перпендикулярно направлению солнечных лучей в течение времени солнечного сияния можно повысить полную отдачу от солнечных элементов приблизительно на 40 %, поскольку без системы слежения за солнцем, эффективность работы солнечных модулей составляет менее 10 %, в то время суток, когда они не направлены перпендикулярно солнечным лучам.

На практике эффективность системы слежения за положением Солнца определяется двумя основными факторами: особенностями прихода солнечной радиации в заданной точке и потребностями в энергии для работы самой системы слежения за Солнцем.

Для выбора оптимальной системы слежения (обеспечивающей максимальный прирост годовой выработки СФЭУ) важно иметь достоверные исходные данные о приходе солнечной радиации. В работе рассматривались данные о приходе солнечной радиации, полученные из трех баз данных (БД): БД «NASA SSE» [1], БД «Meteonorm» и «Научно-прикладном справочнике по климату СССР». Так как исходная информация носит вероятностный характер, то для повышения надежности результатов моделирования, были найдены средние значения прихода суммарной радиации и диффузной составляющей солнечной радиации, которые и использовались для моделирования энергокомплекса. Кроме того, был произведен анализ отклонения значений, полученных из рассматриваемых БД, от средних значений. Данные отклонения, как и различия численных данных рассматриваемых БД, обуславливаются разновидностью способов получения актинометрической информации каждой из баз данных и принятыми в расчете допущениями.

Полученные данные использовались для обоснования оптимальных параметров системы слежения за солнцем, которая устанавливается в моделируемом энергокомплексе [2].

### **Литература**

1. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
2. <http://cxem.net/greentech/greentech16.php>

*А.В. Длугоканский, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ЗАДАЧИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Одной из основных проблем, связанных с ВИЭ, является непостоянство выдаваемой ими мощности, значения которой могут значительно изменяться в течение короткого периода времени [1]. Возможным решением этой проблемы являются сетевые накопители энергии (СНЭ). Оборудование, поддерживающее требуемое качество электроэнергии ВИЭ, должно быть дополнено устройствами, реализующими функции заряда и разряда. Требуемые значения мощности и времени разряда зависят от конкретной ситуации и типа ВИЭ. Однако можно сделать вывод [2], что типовые значения времени разряда для солнечных электрических станций принимаются равными 0,5–2 часа, для ветряных электрических станций – 2-3 часа.

В ходе исследования был проведен анализ существующего рынка электрохимических накопителей электроэнергии, сравнение более 10 видов (свинцовые, натриевые, литий-ионные, ванадиевые, цинк-бромные и др.) [1–6] и произведен сравнительный анализ физических (удельная энергоемкость, рабочее напряжение и др.), эксплуатационных (ресурс, эксплуатационные потери и др.) и экономических показателей накопителей (капитальные затраты с учетом различной установленной мощности, эксплуатационные расходы и др.). Основным показателем принималась удельная стоимость 1 кВт·ч энергии.

Результаты анализа показали, что для работы совместно с установками на основе ВИЭ наиболее применимы ванадиевые (A-VRFB) и литий-ионные (Li) типы аккумуляторов, превосходящие остальные типы аккумуляторов по техническим и экономическим показателям.

### **Литература**

1. **Мхитарян Н.М.** Комплексное использование энергии возобновляемых источников // International scientific journal for alternative energy and ecology. 2013. № 17 (139).
2. **Electric energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits.** ERPI, Palo Alto, CA, 2010.
3. **Хрусталеv Д.А.** Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003.
4. **Eyer, J., Corey G.** Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide. Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, SAND2010-0815, 2010.
5. **Barnes F.S.** Large energy storage systems handbook // NW: CRC Press, 2011.
6. **Li Y., Pan W.** The battery management system applied in smart grid energy storage system// Advanced material research. 2012.

*Д.С. Дорофеев, студ.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЗАГОРОДНОГО ДОМА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ДЕРЕВНЕ МОЛОКОВО**

Целью данной научно-исследовательской работы являлось проектирование экологического солнечного дома с целым комплексом мероприятий, направленных на сбережение энергоресурсов и снижение зависимости от энергосети.

В работе рассмотрены варианты оснащения конкретного загородного дома в Московской области, подключенного к централизованной сети, дополнительными системами энергоснабжения, основанными на использовании ВЭУ и теплового насоса. Выработан алгоритм анализа и на его основе выбрана наиболее эффективная схема гибридной структуры электроснабжения для данного конкретного дома [1].

В ходе выполнения работы был рассмотрен типовой одноэтажный дачный дом площадью 120,68 м<sup>2</sup>, располагающийся в Московской области, предполагающий круглогодичное проживание.

Тепловая нагрузка загородного дома исходя из его конструкции и расположения относительно сторон света (12 934 кВт·ч/год), причем 75 % составляет отопительная нагрузка и 15 % горячее водоснабжение [2].

Был определен приход солнечной радиации через остекленные поверхности (составляет около 6202 кВт·ч/год), причем приход солнечной радиации через южные окна составляет порядка 45 %.

Для обеспечения электроснабжения, отопления и горячего водоснабжения было рассмотрено современное энергетическое оборудование. Выбраны варианты энергоснабжения на базе: существующей электросети, 3 ВЭУ типа WE3000-5кВт фирмы Weswen, теплонасосных установок (ТНУ NIBE Fighter 1145 (15 кВт)).

### **Литература**

1. **Методы** расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. **СНиП 2.08.01–89.** Жилые здания.

*Н.И. Ежиков, Е.И. Климов, студенты;  
рук. О.С. Пташкина-Гирина, к.т.н., доц. (НИУ ЮУрГУ, г. Челябинск)*

## **ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ПОСТРОЙКИ ОТХОДОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Последние несколько десятилетий перед обществом остро стоит вопрос утилизации отходов. Наиболее выгодно перерабатывать отходы в биотопливо, частично решая при этом энергетическую проблему. В первую очередь нами предлагается рассмотреть отходы сельского хозяйства.

В отходы сельского хозяйства входят отходы от выращиваемых культур, мясных хозяйств, рыбной отрасли и другие. Они имеют различия по содержанию жирных аминокислот и сахара. Исходя из этого следует разрабатывать предприятия по утилизации сельскохозяйственных отходов с целью получения разных видов биотоплива. Развитию данной отрасли препятствует проблема выбора места для постройки отходоперерабатывающего предприятия, так как постройка возле одного фермерского хозяйства невыгодна с экономической точки зрения [1]. Для решения данной проблемы предлагается использовать полуавтоматическую систему, выполненную в формате карты, с нанесенной информацией о предприятиях и транспортных каналах между ними. Данная система будет решать логистические задачи и выводить необходимую статистику.

Система использует метод, основанный на использовании приближенных алгоритмов решения задачи коммивояжера в метрическом пространстве – метод остовного дерева [2]. При нехватке ресурсов для расчета остовного дерева будет использоваться графический метод. Пользователю будет необходимо выбрать фермерские хозяйства, а система скомпонует их в треугольники, и будет находить их центры тяжести, которые станут основами для новых треугольников, до нахождения решения. Этот способ менее ресурсоемок, но имеет меньшую точность.

Данная система позволит сократить затраты на поиск оптимального месторасположения для перерабатывающих предприятий. А так же может быть использована в иных целях при внесении в систему новых данных.

### **Литература**

1. **Василов Р.Г.** Перспективы развития производства биотоплива в России. Сообщение 3: биогаз // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчиникова. 2007. Т. 3. № 3.
2. **Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.** Алгоритмы. Построение и анализ. – 2-е изд. М.: Вильямс, 2009.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

До сих пор человечество расходует ресурсы «по потребности», т. е. столько, сколько может добыть и переработать. Предел такому потреблению может поставить истощение существующих запасов энергоресурсов. Если энергопотребление на планете будет по-прежнему обеспечиваться за счет сжигания такого количества органического топлива, то его запасы к концу столетия будут практически полностью израсходованы [1]. Поэтому необходимо повышать КПД уже существующих установок, заниматься энергосбережением, ресурсосбережением и при этом искать альтернативные источники энергии. По этой причине в 2014 году, в рамках бакалаврской дипломной работы было проведено исследование того, насколько эффективно использование альтернативных источников в системах энергообеспечения Российской Федерации. Наиболее широкое применение получили биомасса, ветроэнергетика и гелиоэнергетика. Были проведены исследования гибридных солнечно-ветровых энергетических установок (СВЭУ) для различных регионов Российской Федерации. На основании исследований были выявлены регионы, где применение данных установок наиболее целесообразно для электроснабжения автономных потребителей, не имеющих центрального энергоснабжения. Расчет мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) проводился по формуле [2]:

$$N_p = \frac{R_0}{2} \cdot F \cdot U_p^3 \cdot c_p \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot 10^3 \text{ [кВт]}, \quad (1)$$

где  $R_0 = 1,226 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;  $F = \pi D^2/4$  – ометаемая площадь ветроколеса в  $\text{м}^2$ ;  $U_p$  – расчетная скорость ветра в м/с;  $c_p = 0,4 \div 0,45$  – коэффициент использования энергии ветра;  $\eta_M = 0,85 \div 0,9$  – КПД мультипликатора;  $\eta_G = 0,7 \div 0,95$  – КПД генератора. Значения  $D$  и  $U_p$  выбираются из таблиц.

На основании полученных результатов для установок с различными мощностями были составлены таблицы и графики выработки электрической энергии за год и проведен расчет теоретической стоимости 1 кВт·ч электроэнергии, полученного при помощи ВЭУ.

### Литература

1. Эфендиев А.М. Автономные биоэнергосточники для сельскохозяйственных производителей // Промышленная энергетика. 2011. № 8.
2. Николаев В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф. 2007.

*Зай Яр Лин, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИЛИВНОЙ И МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГИИ МЬЯНМЫ**

Мьянма – развивающаяся страна и располагается в юго-восточной Азии. По современным данным валовые ресурсы солнечной энергии Мьянмы составляют 1,15 млн ТВт·ч в год [1]. Валовые ресурсы ветровой энергии Мьянмы составляют на высоте 10 м – 1820,66 ТВт·ч/год; на высоте 50 м – 4782,01 ТВт·ч/год; на высоте 70 м – 5851,76 ТВт·ч/год и на высоте 100 м – 7248,17 ТВт·ч/год [2]. Валовые ресурсы гидроэнергии для 210 водотоков северных горных районов Мьянмы составляют 150 ТВт·ч/год [3].

Автором была проведена оценка валового гидроэнергетического потенциала Мьянмы 1772 водотоков по всей территории, который составляет 1685 ТВт·ч /год, и потенциала приливной энергии – 11,76 ГВт·ч /год. Оценка валовых потенциалов приливной и малой гидроэнергии для разных районов Мьянмы проводилась по формулам [4]:

$$\mathcal{E}^{\text{ПЭС}} 225 \cdot A^2 \cdot 8760 = 1,97 \cdot 10^6 \cdot A^2; \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{1-2}^{\text{ГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{1-2} \cdot H_{1-2} \cdot 8760, \quad (2)$$

где  $A$  – величина прилива, м;  $Q_{1-2}$ , м<sup>3</sup>/с и  $H_{1-2}$ , м – расход воды и напор между 1-м и 2-м участком водотока;  $\mathcal{E}^{\text{ПЭС}}$  и  $\mathcal{E}_{1-2}^{\text{ГЭС}}$  – валовые потенциалы приливной и малой гидроэнергии.

В Мьянме 3 крупные реки (Иравади, Чиндуин, Салуин) имеют более высокие мощности ГЭС. В северных, западных и восточных горных районах Мьянмы тоже имеются высокие мощности ГЭС.

С юга и юго-запада берега страны Мьянма омываются водами Бенгальского залива и Андаманского моря. Особенно южная часть Мьянмы около берегов обладает огромным потенциалом приливной энергии.

### **Литература**

1. **Лин Аунг Тет, Малинин Н.К., Шестопалова Т.А.** Исследование информационного обеспечения гелиоэнергетических расчетов и ресурсов солнечной энергии Мьянмы // Вестник МЭИ. 2014. № 1.

2. **Зай Яр Мьинг, Виссарионов В.И.** Исследование целесообразности использования ветроэлектрической станции в Мьянме // Вестник МЭИ. 2013, № 1.

3. **Чан Ньен Аунг Тан, Малинин Н.К., Пугачев Р.В.** Оценка ресурсов малой гидроэнергетики северных горных районов Республики Союза Мьянма // Гидротехническое строительство. 2014. № 8.

4. **Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина и др.; под ред. В.И. Виссарионова.** М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*В.А. Илюхина, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТСКОЙ ОБЛАСТИ**

Современный топливно-энергетический баланс Камчатского края и прилегающих к нему территорий характеризуется: большим наличием удаленных изолированных потребителей, устаревшим оборудованием на существующих ТЭЦ, наличием огромного потенциала для развития энергетики на базе ВИЭ, содержащегося в энергии воды, ветра и в геотермальных источниках. Дополнение действующих дизельных электростанций ветроэлектрическими станциями (ВЭС) приведет: к повышению их энергоэффективности; продлению ресурса за счет снижения их использования; повышению надежности энергоснабжения потребителей; сокращению затрат на дизельное топливо. Для выбора параметров внедряемых ВЭУ была проведена оценка основных энергетических характеристик ветра на территории Камчатской области по данным 21 наземной метеостанции (МС). На площадках МС были определены основные энергетические характеристики ветра: среднемноголетние скорости ветра  $V_0$  по территории меняются в диапазоне от 1,9 до 7,3 м/с; удельные валовые мощности  $N_{уд}$  по территории меняются в диапазоне от 0,01 до 0,54 Вт/м<sup>2</sup>, повторяемости скоростей  $f(V)$  и направлений ветра. Информация по метеоданным для рассматриваемой территории была получена из двух специализированных баз данных (СБД) «Погода России» [1] и «Флюгер». Построены карты распределения по всей территории приведенных к условиям открытой ровной местности  $V_0$  и  $N_{уд}$  [2].

В качестве примера был осуществлен выбор энергоэффективной модели ВЭУ для локального энергокомплекса п. Усть-Камчатск, пиковая нагрузка которого составляет 916 кВт, по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ  $\kappa_{ВЭУ}^{исп}$ . В результате проведенных расчетов были выбраны наиболее энергоэффективные модели ВЭУ на разной высоте: на высоте 37 м – модель Northwind с высотой башни 37 м; на высотах 30/40/50 метров – модель Aeronautica, на высоте 41,5 м – модель Komai.

### **Литература**

1. **Российский** метеорологический сайт «Погода России» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.info.space.ru>
2. **Расчет** ресурсов ветровой энергетики / В.И. Виссарионов, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин и др. М.: Издательство МЭИ, 1997.

*И.С. Ищенко, асп.; рук. Т.А. Шестопалова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВЕТРОДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА (НАО)**

Энергоснабжение автономных потребителей с применением возобновляемых источников энергии, в отдельных районах РФ, уже сейчас оказывается экономически более целесообразным, чем использование жидкого топлива или подключение к общей электросети. В связи с чем, появляется практический интерес к установкам небольшой мощности, работающим на отдельного потребителя или локальную систему.

В проделанной работе проводилось исследование эффективности создания ветродизельного комплекса для электроснабжения поселка Усть-Кара в НАО. Графики нагрузки для характерных суток зимнего и летнего периодов были получены моделированием электропотребления различных объектов населенного пункта.

Оценка возможности использования ветровой энергии в рассматриваемой точке выполнялась на основании анализа многолетних рядов наблюдения за скоростью и направлением ветра, полученным из специализированной базы данных (СБД) «Расписание погоды» [1, 2].

Выбор ветроагрегатов выполнялся на основании единичной мощности ВЭУ, ее класса, климатического исполнения и коэффициента использования установленной мощности. Кроме того, для нормальной работы энергокомплекса требуется введение в систему балластной нагрузки, представляющей собой электронагревательную установку, и аккумуляторных батарей.

Расчет экономической эффективности различных компоновок ВДК проводился на основе анализа доходов за счет сэкономленного дизельного топлива и расходов в виде эксплуатационных издержек и капвложений. В результате сравнительной оценки решено использовать комплекс с 2 ВЭУ FD21-100/12 по 100 кВт. Этот вариант обладает наибольшим значением ЧДД, равным 49,816 млн руб., и небольшим сроком окупаемости (8 лет).

Применение рассматриваемого в работе энергокомплекса на базе ветроэнергетических и дизельных установок, в условиях НАО, является весьма перспективным, так как использование выбранного состава ГЭК обеспечивает покрытие около 61 % нагрузки поселка за счет выработки ВЭУ.

### **Литература**

1. СБД «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ru/6115/ru>
2. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

*К.О. Киселев, студ.; рук-ли О.А. Фролков, дир. Инженерного центра;  
И.В. Якименко, д.т.н., доц. (филиал МЭИ в г. Смоленске)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА**

Мощность свободно доступных потребителю ВГ составляет единицы киловатт в номинальном режиме, поэтому актуальна задача оптимизации режима работы имеющегося ВГ, с целью получения максимально возможного количества энергии.

Как и солнечная панель, ВГ обладает нелинейной выходной ВАХ. При этом в литературе [1] приведена экспоненциальная формула оптимальной ВАХ нагрузки ВГ. Однако математическое моделирование показало, что более эффективной является квадратичная ВАХ (см. табл. 1).

Таблица 1

### **Объем вырабатываемой энергии при различной нагрузке**

Входные данные	№ 1	№ 2	№ 3
Противо-ЭДС (экспериментально)	0	$2,46 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$
Экспоненциальная (exp)	$3,1 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$
Квадратичная	$3,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^5$	$2,44 \cdot 10^5$

Так же возможно повышение энергоотдачи за счет динамических свойств нагрузки: 1) временное отключение нагрузки для облегчения выхода ВГ из режима срыва потока при резком порыве ветра; 2) значительное увеличение потребления энергии при ослаблении ветра, для недопущения перехода ВГ в режим вентилятора. Сравнение этих методов приведено в табл. 2.

Таблица 2

### **Сравнение вырабатываемой энергии при динамическом потреблении**

Входные данные	№ 1	№ 2	№ 3	Меандр
Статическая ВАХ	$3,77 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^5$	$2,44 \cdot 10^5$	$9,61 \cdot 10^5$
Динам. потр. (1)	$3,76 \cdot 10^4$	$2,71 \cdot 10^5$	$2,41 \cdot 10^5$	$9,78 \cdot 10^5$
Динам. потр. (2)	$3,81 \cdot 10^4$	$2,85 \cdot 10^5$	$2,48 \cdot 10^5$	$9,55 \cdot 10^5$
Динам. потр. (1 + 2)	$3,77 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^5$	$2,46 \cdot 10^5$	$9,81 \cdot 10^5$

Таким образом, возможно увеличение эффективности ВГ до двух раз. При этом интересен факт, что эффективность динамического потребления оказывается зависимой от формы сигнала ветра, что открывает дополнительные возможности оптимизации динамического потребления по более сложным алгоритмам.

### **Литература**

1. **Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.** Неисчерпаемая энергия. Книга 2: Ветроэнергетика. Харьков: Харьковский авиационный институт, 2004.

Е.И. Климов, Н.И. Ежиков, П.В. Гутевич (ЧелГУ), студенты;  
рук. Е.В. Соломин, д.т.н., проф. (ЮУрГУ, г. Челябинск)

## ОТНОШЕНИЕ ГРАЖДАН РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К ВОПРОСУ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Вопрос размещения ветроэнергетической установки (ВЭУ) в городской среде вызывает ряд негативных ассоциаций: влияние шума и вибрации на население, блокирование территории, возникновение радиопомех и эстетическая неприязнь [1]. Но упомянутые недостатки исправимы и зависят от конструкции [2]. Вопрос блокирования территории мы предлагаем решать, размещая ВЭУ на инженерных конструкциях (кровлях зданий, мостовых конструкциях и др.). Для выявления отношения населения к размещению ВЭУ в городской среде было проведено исследование в форме опроса, распространенного при помощи социальных сетей. Опрос содержал ряд вопросов о респондентах (пол и образование), а также вопросы о размещении ВЭУ в городской среде. Результаты опроса отношения к расположению ВЭУ в публичных местах и на крышах жилых зданий представлены на рис. 1 под буквами *а*) и *б*) соответственно. Также был проведен анализ соотношения мнений респондентов относительно статуса их образования и его направления.



Рис. 1. Результаты опроса отношения к расположению ВЭУ в городской среде

Результаты доказывают, что граждане РФ поддерживают инициативу размещения ВЭУ на инженерных сооружениях в городской среде. Это говорит о том, что эстетическая неприязнь к ВЭУ среди населения не имеет достаточной силы для препятствия их размещению в городской среде на инженерных сооружениях.

### Литература

1. Колесникова И.В. Эстетико-экологические проблемы ветроэнергетики // ВЕСТНИК ОГУ. 2013. № 7 (156).
2. Соломин Е.В. Размещение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения на ответственных инженерных объектах // Вестник ЮУрГУ. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. Вып. 11. 33(209).

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ**

Венесуэла обладает огромными запасами нефтяных ресурсов, при этом 70 % составляет тяжелая нефть, что приводит к необходимости использования тепловых методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП). Основная цель тепловой нефтедобычи – сократить вязкость пластовой нефти в месторождении и ускорить нефтедобычу. В основном это достигается увеличением температуры сырья путем нагрева. Пар – отличный проводник тепла и часто используется в тепловых ПНП проектах.

Для того чтобы определить термические параметры пара, необходимые для повышения нефтеотдачи пластов (температура, давление, качество и количество), нужно учесть основные характеристики нефтяного месторождения: давление, глубина, пористость и неоднородность коллекторов; структура грунта, подвижность нефти и другие.

При увеличении глубины залегания нефти требуется увеличение давления нагнетаемого пара и большая производительность парогенератора. В случае неглубокого месторождения эффективность нагнетания пара увеличивается за счет меньших потерь тепла и более низкого уровня требуемого давления пара.

По определенным для данного месторождения объему и параметрам нагнетаемого пара определяется количество параболоцилиндрических концентраторов (ПЦК). При этом только часть потока солнечной энергии перейдет в тепловую энергию, передаваемую жидкости. Часть энергии теряется из-за оптических характеристик концентратора, часть – в результате отличия угла падения от нуля ( $\varphi \neq 0^\circ$ ), часть рассеивается при нагревании теплоносителя.

В целом для определения количества ПЦК необходимо: определить объем и параметры нагнетаемого пара; определить массовый расход и скорость движения жидкости в ПЦК; рассчитать потери энергии в ПЦК; рассчитать температуру на выходе ПЦК; определить общее количество и схему соединения ПЦК.

Эффективность использования ПЦК для производства необходимого количества пара по сравнению с использованием органического топлива рассчитывается для конкретного месторождения на основе финансово-экономического анализа.

Мин Зо Лин, асп.; рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)

## ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЭС В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ МЬЯНМЫ

Мьянма – развивающаяся, тропическая страна, расположенная на западе Индокитайского полуострова. Площадь страны составляет 678,5 тыс. км<sup>2</sup>. По данным на конец 2014 года, население страны составляет около 51 млн человек, из них около 70 % проживает в сельской местности. По территории Мьянмы (Бирмы) протекают четыре крупные реки: Йервади протяженностью 2063 км, Чиндвин протяженностью 1660 км, Салуин протяженностью 1151 км, Ситаун протяженностью 310 км. Основную долю в производстве электроэнергии в Мьянме занимают ГЭС (см. табл. 1).

Таблица 1

### Доля различных электростанций в объединенной энергосистеме Мьянмы

Тип станций	ГЭС	ГТУ	ТЭС	Итого
Установленная мощность (МВт)	3151	996	120	4267
Доля установленной мощности (%)	73.84	23.34	2.82	100

В настоящее время в стране строится 20 ГЭС с установленной мощностью 2500 МВт. В стадии проектирования находятся еще 48 проектов ГЭС мощностью 44215 МВт [1]. Большинство построенных и проектируемых ГЭС находятся на севере страны. Хотя страна богата природными ресурсами, но они мало используются из-за проблем технологии, экономики и менеджмента.



Рис. 1. Динамика роста годовой потребности в электроэнергии в Мьянме

### Литература

1. **Отчет 2013.** Министерство электроэнергии Мьянмы, Ministry of electric power MOEP (Myanmar).

*Р.К. Мухамедзянов, студ.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ САНАТОРНОГО КОМПЛЕКСА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ НА БАЗЕ ВИЭ**

В качестве объекта проектирования рассматривается оздоровительный комплекс в деревне Кострово Истринского района Московской области. В данном населенном пункте отсутствует центральное газо- и электро-снабжение, поэтому рассматриваются различные варианты энергоснабжения объекта на базе СФЭМ, ДЭУ, ТНУ и СК [1]. Общая площадь комплекса 1349,78 м<sup>2</sup>, жилая площадь 1131,56 м<sup>2</sup>.

По результатам теплотехнического расчета [2] исходя при расчетной температуре наружного воздуха –28 °С расчетная мощность тепловой нагрузки составила: 32,2 кВт – тепловая нагрузка на отопление, 19,8 кВт – максимальная нагрузка на горячее водоснабжение.

В табл. 1 проведен сравнительный анализ технических характеристик двух энергокомплексов: Энергокомплекс № 1: ТНУ – отопление и ГВС, СФЭМ – электроснабжение, Дизельный генератор – резервное энергоснабжение; энергокомплекс № 2: ТНУ – отопление и система ГВС, СК – система ГВС, СФЭМ – электроснабжение, Дизельный. Окончательный выбор энергокомплекса должен проводиться с учетом экономических показателей.

Таблица 1

**Сравнительные технические показатели двух энергокомплексов**

Параметр	Ед. изм.	№ 1	№ 2
Годовое потребление тепла	кВт·ч/год	85 875	
Годовая выработка ТНУ	кВт·ч/год	85 875	<b>73 201</b>
Годовая выработка СК	кВт·ч/год	–	<b>12 674</b>
Мощность ТНУ	кВт	65,5	
Количество СК	шт.	–	<b>11</b>
Потребление ЭЭ <sub>быт.нагр</sub>	кВт·ч/год	8800,0	
Потребление ЭЭ <sub>ТНУ</sub>	кВт·ч/год	26 836	<b>22 875</b>
Общее потребление ЭЭ	кВт·ч/год	35 636	<b>31 675</b>
Количество СФЭМ	шт.	55	25
Годовая выработка СФЭМ	кВт·ч/год	<b>15 492</b>	7439
Годовая выработка дизеля	кВт·ч/год	<b>20 144</b>	24 236

### **Литература**

1. **Методы** расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

2. **СНиП 2.08.01-89.** Жилые здания.

*В.А. Рафаилова, студ.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

В работе производится расчет и анализ энергетических характеристик ветра на территории Томской области с целью определение наиболее целесообразного места размещения ветроэлектрической станции (ВЭС).

Для перспективности использования ветровой энергии необходимо иметь достоверную информацию о ветре, которая может быть выявлена в результате статистического анализа метеонаблюдений. В качестве исходных данных используются многолетние ряды часовых значений скорости и направлений ветра на высоте 10 м от поверхности земли, полученные на сети метеорологических станций (МС) Томской области [1]. Для всех МС рассчитывались следующие характеристики ветра: среднемноголетняя скорость, коэффициент вариации, повторяемости скорости. По построенным картам распределения среднемноголетней скорости ветра и удельной мощности была определена область для возможной установки ВЭС с наиболее высокими ветроэнергетическими показателями.

Предполагается установка ветропарка вблизи села Александровское. Координаты площадки для установки ВЭС – 60°25' с.ш., 77°54' в.д. В этой точке были рассчитаны энергетические характеристики ветра на разных высотах. С ростом высоты башни ВЭУ относительный прирост годовой энергии (в процентах) замедляется с высоты 50 м, причем характер изменения прироста идентичен для всех типов ВЭУ. Поэтому рассматривались ВЭУ с высотой башни не более 50 м.

Выбор установок в заданной точке происходил по двум основным критериям: климатические условия [2] и коэффициент использования установленной мощности.

В результате расчетов было выбрано наиболее энергоэффективное оборудование: WindPower модели G-3120 с высотой башни 30 и 40 м, Norwin модели 47-ASR-500 с высотой башни 50 м.

### **Литература**

1. **Российский** метеорологический сайт «Погода России» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.infospace.ru/>
2. **ГОСТ Р 51991–2002**. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ВЕНЕСУЭЛЕ**

В 2010 году Венесуэла вышла на первое место в мире по разведанным запасам нефти, которые составляют 297,6 млрд баррелей [1]. Основную роль в экономике страны играет добыча нефти и нефтеперерабатывающая промышленность, дающие основной приток валютных поступлений.

В области использования солнечной энергии реализуется государственная программа по установке фотоэлектрических станций в сельской местности. Программа носит название «Посеем свет» и включает три этапа: первый этап направлен на обеспечение школ, медицинских учреждений и коммунальных служб, второй – на подключение домашних хозяйств, и третий – на подключение промышленных предприятий. Чрезвычайно важно решить задачу энергообеспечения труднодоступных регионов, не подключенных к общим сетям, особенно в удаленных районах с дефицитом традиционных источников энергии. Таким образом, правительство планирует увеличить инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии с целью сокращения потребления органического топлива внутри страны и увеличения доходов от экспорта нефти.

В децентрализованных районах электрификацию населенных пунктов с помощью солнечной энергии целесообразно решать путем создания распределенных систем на основе фотоэлектрических модулей. При этом структура и параметры схем энергоснабжения различных объектов будут зависеть как от потребности в электроэнергии, так и от энергетических и экономических показателей используемых солнечных модулей. Исходя из этого в работе сопоставляется экономическая эффективность применения различных видов солнечных модулей: обычных на основе кремния, модулей с линзовыми концентраторами, модулей с голографическими концентраторами.

Учитывая субэкваториальный климат Венесуэлы, использование фотоэлектрических модулей на основе кремния в условиях высоких дневных температур (26,9–29,1 °С) может привести к снижению их КПД на 3–4 %. В связи с этим рассматривается возможность использования солнечных модулей с водяным охлаждением, что позволит не допустить снижения КПД более чем на 1%. В результате исследований планируется выработать рекомендации по эффективности использования конкретных схем электроснабжения автономных потребителей различного типа в рамках государственной программы Венесуэлы.

### **Литература**

1. ОПЕК World Oil Outlook, 2012.

*В.М. Савенков, студ.; рук. Р.С. Цгоев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

Данная работа является первой ступенью исследования асинхронизированного электромеханического преобразователя частоты – в ней он рассматривается в установившихся режимах. Такой преобразователь предназначен для сглаживания колебаний частоты генерируемой ветроустановками электроэнергии. Возникают эти колебания из-за непостоянства скорости ветра во времени и пространстве, из-за чего каждый отдельный ветроагрегат имеет непостоянную во времени мощность, которая к тому же различается между разными агрегатами, что и вызывает колебания частоты в сети.

Предлагаемый преобразователь частоты устроен следующим образом: отдельные ветрогенераторы подключены не к выдающим шинам станции, а к отдельным же, электрически несвязанным, электродвигателям. Роторы этих двигателей соединены общим валом, таким образом, развиваемый двигателями момент на этом валу суммируется. На конце же этого вала закрепляется ротор еще одного генератора, который в свою очередь энергию вращения вала преобразовывает в электрическую энергию. Таким образом осуществляется гальваническая развязка между ветрогенераторами, что исключает их взаимное влияние друг на друга, а также придает системе определенную инертность, что сглаживает резкие изменения мощности ветрового потока.

По результатам проведенного моделирования в установившихся режимах рассматриваемый преобразователь действует, как и предполагалось: мощность конечного общего генератора соответствует сумме мощностей, вырабатываемых подключенными к комплексу ветроустановками (в точности равна этой сумме, если пренебречь потерями в двигателях и подшипниках).

В.И. Саенко, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

## ВЭУ В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА (НАО)

Современный (ТЭК) Земли функционирует и развивается в особых условиях: непрерывный рост стоимости органического топлива и неравномерность его распределения по территории земли. Сегодня весь мир все больше и больше уделяет внимание освоению возобновляемых источников энергии [1]. Поэтому весьма актуальной является задача энергоснабжения децентрализованных потребителей на базе ВЭУ.

Целью данной работы является выбор типовых моделей ВЭУ, внедряемых в существующие локальные энергокомплексы (ЛЭС) 22 населенных пунктов (н.п.) НАО по критерию энергоэффективности, в качестве которого был принят среднемноголетний коэффициент использования установленной мощности  $K_{\text{иум}}$ :

$$K_{\text{иум}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}(T)}{N_{\text{ВЭУ}}^{\text{уст}} T}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ВЭУ}}$  – установленная мощность ВЭУ;  $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}(T)$  – энергия, вырабатываемая ВЭУ за период времени  $T$  (один год) по ряду скорости ветра с сайта «Погода России» (Режим доступа: <http://www.info.space.ru>).

Для определения установленной мощности ( $N_{\text{уст}}$ ) ЛЭС были использованы данные по удельному потреблению дизельного топлива на 1 жителя, которое меняется от 0,18 до 3,85 тн/чел по территории НАО. Проведенная оценка  $N_{\text{уст}}$  выявила диапазон ее изменения от 25 до 859 кВт. Для выбора оптимальных типовых моделей ВЭУ потребителей 22 н.п. условно разделили на 3 группы по мощности: 1-я группа (от 20 до 100 кВт), 2-я группа (от 100 до 293 кВт) и 3-я группа (от 293 до 859 кВт).

Для применения в составе ЛЭС НАО было предварительно выбрано 23 модели ВЭУ малого (от 30 до 100 кВт) и среднего (от 100 до 800 кВт) диапазона мощностей, выбор которых производился в соответствии с классами безопасности по ИЕС 61400-2–2006 и с учетом климатического исполнения в соответствии с ГОСТ Р 51991–2002.

В результате расчета для каждой группы потребителей была выбрана общая типовая модель ВЭУ с одинаковой высотой башни ( $H_6$ ): 1-я группа модель *WindPower* (Endurance WindPower, США)  $N = 35$  кВт,  $H_6 = 30$  м, 2-я группа модель *Northwind 100* (Northern Power Systems, США)  $N = 100$  кВт,  $H_6 = 37$  м., 3-я группа *Norwin* (Дания)  $N = 500$  кВт,  $H_6 = 40$  м.

### Литература

1. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2012.

*М.М. Философов, студ.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЗАГОРОДНОГО ДОМА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ПОСЕЛКЕ ХОТЬКОВО**

В работе рассматривается энергоэффективный дом с применением теплового насоса (ТНУ), солнечных панелей (СФЭУ), солнечных коллекторов (СК) и ветроустановки (ВЭУ) в Московской области, обеспечив круглогодичное проживание в доме и снижение электрической и тепловой нагрузки на дом, а также затраты на покупку электроэнергии из сети.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы был спроектирован двухэтажный загородный дом площадью 295 м<sup>2</sup>, расположенный в поселке Хотьково Московской области, рассчитанный на круглогодичное проживание в нем семьи из пяти человек. В проекте были проведены исследования возможности и целесообразности применения различных систем электроснабжения и отопления на базе действующей электросети, подведенной к участку, и современного оборудования возобновляемой энергетики [1].

Была определена тепловая нагрузка дома (22 МВт·ч/год), где 87 % составляет отопительная нагрузка и 8 % – горячее водоснабжение. Помимо этого был вычислен оптимальный угол наклона приемной площадки по критерию максимума прихода солнечной радиации (40°). Ежемесячная оптимизация угла наклона площадки дала незначительный прирост энергии около 8 %.

Был определен приход солнечной радиации через остекленные поверхности (17,3 МВт·ч/год). Через южные окна приход солнечной радиации составляет около 32 %, северные – 12 %, западные – 19 % и восточные – 37 %.

Для обеспечения отопления и горячего водоснабжения были выбраны современные ТНУ (Viessmann Vitocal 300-G с тепловой мощностью 10,14 кВт) и вакуумные СК ES 58-1800-20 R1 производства Sunrain). Электрическую бытовую нагрузку покрывает выработка электроэнергии солнечными модулями и потребление из сети. Для реализации схемы электроснабжения потребовалась установка 18 СФЭМ Chinaland Solar Energy СНН300-72М производства Китай 300 Вт каждый.

На основании метеорологических наблюдений метеостанции в городе Дмитров, был сделан вывод, что установка ветрогенератора является нецелесообразной, так как коэффициент использования пяти рассматриваемых ВЭУ получился менее 0,1 ед.

### **Литература**

1. **Методы** расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*А.С. Харибина, асп.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

На данный момент более половины российской территории, прежде всего отдаленные районы Крайнего Севера, Дальнего Востока и Восточной Сибири, где живет около 20 % населения страны, не имеет централизованного электро- и теплоснабжения. Например, более 2/3 территории Якутии являются зоной децентрализованного энергоснабжения. Поскольку эта зона охватывает главным образом северную часть республики со сложными условиями доставки топлива, особенно острыми становятся проблемы энергетической безопасности.

Основой энергоснабжения потребителей в отдаленных от электрических сетей районах являются около 200 дизельных электростанций. Однако техническое состояние большей части оборудования оставляет желать лучшего. Усредненный износ дизельных генераторов составляет около 70 %, котельных установок – примерно 60 %. Эксплуатация большей частью устаревших и физически изношенных энергоустановок, определяет их низкую экономичность (удельный расход топлива на производство на дизельных электростанциях достигает 500–600 г у.т./кВт·ч при КПД 20–25 %), что приводит к недостаточной надежности энергоснабжения и неоправданно высоким финансовым затратам [1].

Очевидным путем повышения энергоэффективности таких зон является максимальное использование местных возобновляемых энергоресурсов.

Повышение эффективности децентрализованного энергоснабжения может быть достигнуто путем внедрения комбинированного производства электрической и тепловой энергии. Для электроснабжения был выбран энергокомплекс, состоящий из ветроэнергетических (полярного исполнения) и резервных дизельных установок. Для теплоснабжения используются теплонасосные установки, обеспечивающие отопление и горячее водоснабжение. В связи с преимущественно низкой температурой воздуха и глубиной промерзания грунта порядка 30–35 м, целесообразно использование ТНУ по типу «вода-вода».

### **Литература**

1. **Васильев Г.П.** Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: монография. М.: Издательский дом «Граница», 2006.

Д.А. Чернов, асп.; рук-ли Г.В. Дерюгина, ст. преп;  
М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

В работе представлены результаты анализа моделей вертикального профиля ветра по данным фактических наблюдений на площадках 7 ветроизмерительных комплексов (ВИК) на территории Дальневосточного Федерального округа (ДФО). Проведено уточнение эмпирических зависимостей среднего показателя степенной зависимости вертикального профиля (коэффициента Хеллмана)  $m$  от средней скорости ветра  $V$  на высоте 10 м по 10-минутным рядам наблюдений на разной высоте ВИК [1]. Также было проведено выявление для ВИК аэрологических метеостанций (АМС) аналогов из СБД «Вертикальный профиль ветра» [2, 3] и сопоставление модельных зависимостей вертикального профиля ветра  $m(V)$  по данным АМС-аналогов с зависимостями, полученными на площадках ВИК.

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. На предпроектных стадиях оценки среднесуточной скорости ветра на различной высоте в регионах ДВФО рекомендуется применять эмпирическую зависимость среднесуточного коэффициента Хеллмана  $m_0$  от среднесуточной скорости ветра  $V_0$  вида  $m_0 = 0,6827V_0^{-0,914}$ , полученную в результате обработки данных СБД «Вертикальный профиль ветра», так как среднеквадратическое отклонение показателей Хеллмана при сравнении зависимостей  $m(V)$  при  $m$ , определенным по фактическим данным на площадках ВИК и эмпирической зависимости для ДВФО (см. рис. 1), в 6 случаях из 7 не превышает 18 %, что в свою очередь приводит к погрешности, не превышающей 5 % в определении средней скорости ветра.

2. На территории ДВФО для пересчета повторяемости скорости ветра на высоту оси ВЭУ рекомендуется применять теоретическое распределение Вейбулла [1]. При определении параметра  $\gamma$  распределения Вейбулла на разной высоте допускается принимать его неизменным, равным значению, определенному по фактическим данным на высоте 10 м по формуле Гарцмана [1], при этом ошибка в определении средней скорости ветра без учета изменения параметра  $\gamma$  по высоте составляет в среднем 8,5 %.

3. Для получения эмпирических зависимостей внутригодового изменения параметра  $m$  от среднемесячной скорости ветра  $m(V_i)$  требуется период наблюдения не менее 5–10 лет, так как годовые вариации скорости вет-

ра в многолетнем разрезе и данные года наблюдения на ВИК могут не соответствовать среднемуголетнему году.

4. Анализ влияния внутригодового распределения коэффициента Хеллмана показал:

- Учет параметров местности – шероховатости и орографии повышает точность определения выработки перспективной ВЭУ в среднем на 10 %.

- Повышение обеспеченности на 40 % при расчете выработки электроэнергии ВЭС приводит к снижению коэффициента использования установленной мощности  $K_{ИУМ}$  в среднем на 8–9 % по всем моделям ВЭУ.

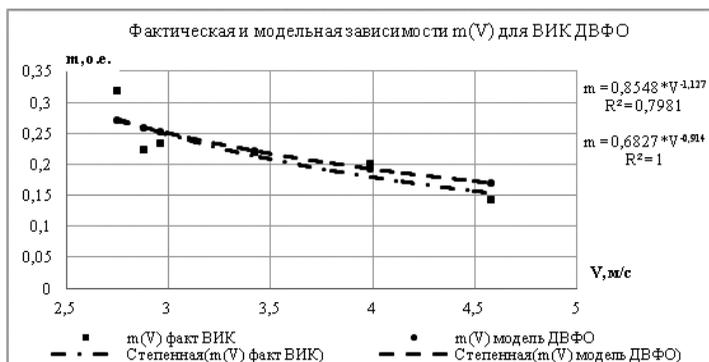


Рис. 1. Фактическая и модельная зависимости  $m(V)$  для ВИК ДВФО

## Литература

1. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета. М.: Издательство МЭИ, 2013.
2. 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.
3. Чернов Д.А., Дерюгина Г.В. Методика оценки параметров проектируемых ветроэлектрических станций с учетом внутригодовых изменений вертикального профиля ветра // Тр. 9-й Междунар. научн.-техн. конф. М.: Издательство ВИЭСХ, 2014.

*В.В. Шестакова, студ.; рук. И.М. Кирпичникова, д.т.н., проф.  
(ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск)*

## **ЧЕЛОВЕК КАК ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Развитие человеческой цивилизации всегда было связано с поисками новых источников энергии. Энергия – она вокруг нас и внутри нас. И изучение этого вопроса может дать неожиданные результаты.

Научная новизна исследования состоит в том, что в качестве альтернативного источника энергии рассматривается человек. Как известно, человеческое тело может проводить через себя электрический ток. Если рассматривать его как элемент электрической цепи, человек является сложным проводником. Различные ткани организма обладают разной проводимостью. Кожа имеет большое удельное сопротивление, она и определяет фактическое сопротивление человеческого тела [1].

Достаточно высокая проводимость человеческого организма обусловлена ни чем иным как 80 % содержанием воды в нем [2]. Вода насыщена растворенными в ней солями и микроэлементами, именно поэтому проводимость достигает высоких значений.

Тело живого организма полностью состоит из клеток, они являются мельчайшей структурно-функциональной единицей организма. Через них проходят все токи, они определяют сопротивление и проводимость, а значит, каждая клетка организма – потенциальный источник энергии [3].

Внутри клетки находится множество органелл, каждая из которых имеет свою функцию. Решив рассмотреть клетку со стороны энергетики и источника тока, мы заметили, что ее строение напоминает электрическую схему со своим генератором тока. В ней в качестве «генератора» выступает митохондрия. В митохондриях осуществляется обеспечение клеток энергией – преобразование энергии химических связей питательных веществ в связи АТФ. Благодаря молекулам АТФ организм получает энергию для жизни. Изучив многочисленные химические процессы выработки энергии в животной клетке, мы выявили ее схожесть с работой электрических станций в современном мире.

Комплексное изучение клетки на микроскопическом уровне – это очень перспективная тема для физиков, биологов и медиков. Но уже сейчас можно сказать, что в ней скрыты невероятные возможности человека, зная которые он сможет обходиться только своим внутренним источником энергии и не зависеть от внешних условий существования.

### **Литература**

1. **Лихачев В.Л.** Электротехника: справочник. Том 1. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.
2. **Чандаева С.А.** Физика и человек. М.: Аспект Пресс, 1994.
3. **Беркинблит М.Б., Глаголева Е.Г.** Электричество в живых организмах. М.: Наука, 1988.

## **ЭЛЕКТРОФИЗИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

*Председатель секции — к.т.н., доцент Я.Л. Арцишевский*

*Секретарь секции — к.т.н., доцент А.В. Орлов*

*О.О. Ананченко, студ.; рук. Р.В. Темкина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 500 кВ**

Линии электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН) 330–750 кВ большой протяженности (больше 150 км) являются частью системообразующей сети. Назначение такой сети – формирование структуры ЕЭС и выполнение функции передачи электрической энергии.

Одним из основных требований, предъявляемых к таким связующим линиям, является обеспечение надежности и устойчивости их работы во всех возможных режимах [1]. Это требует совершенствования устройств релейной защиты и автоматики.

Однако материалы по осциллограммам и значениям параметров таких сетей доступны немногим, что затрудняет исследования данного вопроса.

Именно поэтому первая часть работы посвящена разработке модели сети, включающей линию 500 кВ. Для рассмотрения данного вопроса используется программный комплекс MatLab. Созданная модель позволяет наблюдать основные физические процессы, характерные для воздушных линий (ВЛ) СВН, что дает возможность получать осциллограммы режимов, векторные диаграммы, а также производить спектральный анализ. Все это делает физические процессы таких ВЛ наглядными и доступными для изучения.

Вторая часть работы посвящена основной защите ВЛ СВН, а именно: дифференциальной защите линии (ДЗЛ). Так как в настоящее время крупные производители, выпускающие терминалы защиты, не раскрывают своих алгоритмов, это исключает всякую возможность их исследования. В работе рассмотрен алгоритм ДЗЛ, разработанный на базе основных принципов данного типа защиты с учетом особенностей сети [2].

В завершающей части работы исследована интеграция разработанного алгоритма ДЗЛ в созданную модель сети, а также выполнена проверка работоспособности алгоритма защиты во всех режимах, включая сложные несимметричные режимы и качания.

В перспективе исследования – совершенствование алгоритма ДЗЛ, усложнение схемы сети в модели, а также исследование рассмотренных моделей с помощью программного комплекса PSCAD для верификации полученных результатов.

### **Литература**

1. **Лосев С.Б., Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И.** Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «ГРОЗА» ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

Уникальный экспериментальный комплекс «Гроза» относится к типу генераторов заряженного аэрозоля с конденсационным водным аэрозолем, с зарядкой в поле коронного разряда и горизонтальным выбросом. Схема экспериментального комплекса представлена на рис. 1.

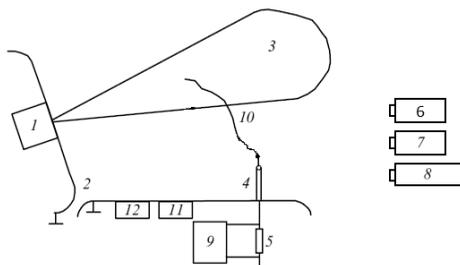


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса

Искусственно заряженное облако водного аэрозоля создается генератором заряженного аэрозоля 1. Облако заряженного аэрозоля (ЗАО) 3 отрицательной полярности формируется над заземленной металлической плоскостью 2.

При проведении экспериментальных исследований на заземленной плоскости под ЗАО располагается заземленный стержневой электрод 4. Вершина стержневого электрода электрически изолирована от основной стержневой части. Измерительная часть экспериментального комплекса включает в себя малоиндуктивные токовые шунты 5, а также осциллографы 9 для измерения тока разряда 10. На осциллограф подается управляющий сигнал от самого источника сигнала или от системы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) 6, которая фиксирует световое излучение искры. Также оптическая картина развития разрядных процессов фиксируется цифровым фотоаппаратом 7 и видеокамерой 8. Напряженность электрического поля, создаваемая заряженным аэрозольным облаком, контролируется установленным в заземленной плоскости 2 датчиком 11. Изменение заряда аэрозольного облака вследствие возникновения разрядных явлений отслеживается динамической антенной 12 [1]. С помощью этого комплекса получены экспериментальные данные для последующего анализа.

### Литература

1. Верещагин И.П., Темников А.Г., Орлов А.В. Экспериментальное исследование параметров стебля импульсной короны и его перехода в первый участок лидера с использованием облака заряженного аэрозоля // Новое в российской электроэнергетике. 2003. № 3.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В ВОЗДУХЕ

Цель работы состояла в расчете и изучении распространения катодонаправленного стримера в заполненном воздухом разрядном промежутке с однородным электрическим полем при нормальных атмосферных условиях. Использована диффузионно-дрейфовая модель стримера в ее трехмерной реализации [1], разработанной на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ».

Исследовано влияние напряженности  $E_0$  внешнего однородного поля на скорость распространения головки стримера  $V_s$ , ее диаметр  $D_s$ , максимальную напряженность поля в ней  $E_{\max}$  ( $E_0 = 50\text{--}70$  кВ/см).

Оказалось, что начальный диаметр головки близок к 0,01 см и слабо зависит от значения  $E_0$ . Чем оно больше, тем быстрее расширяется головка, когда стример достигает длины  $L_s \approx 0,12$  см, значение  $D_s$  увеличивается до  $\approx 0,018$  см при  $E_0 = 50$  кВ/см и до  $\approx 0,032$  см при  $E_0 = 70$  кВ/см (рис. 1).

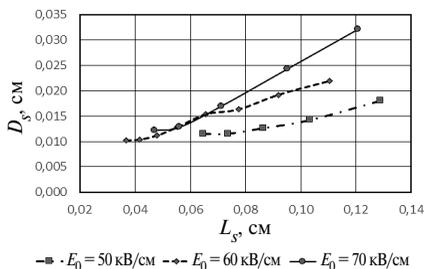


Рис. 1. Зависимости диаметра  $D_s$  головки стримера от его длины  $L_s$  для различных напряженностей  $E_0$  внешнего поля

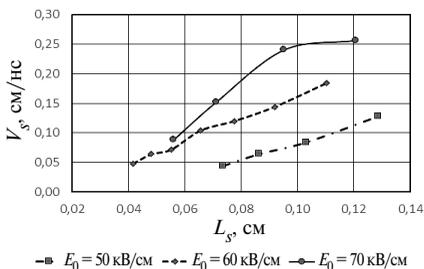


Рис. 2. Зависимости скорости распространения стримера  $V_s$  от его длины  $L_s$  для различных значений  $E_0$

Скорость распространения головки тем больше, чем сильнее внешнее поле: в исследованном интервале  $L_s \approx 0,04\text{--}0,13$  см при  $E_0 = 50$  кВ/см она нарастает от  $\approx 0,04$  до  $\approx 0,13$  см/нс, а при  $E_0 = 70$  кВ/см – от  $\approx 0,09$  до  $\approx 0,26$  см/нс (рис. 2). Следовательно, для фиксированного  $L_s$  в рассмотренном диапазоне величин значения  $V_s$  приблизительно пропорциональны  $(E_0)^2$ .

Показано, что максимальная напряженность поля в головке увеличивается по мере удлинения стримера, но слабее зависит от  $E_0$ : при  $E_0 = 50\text{--}70$  кВ/см для фиксированного  $L_s$  вариации  $E_{\max}$  не превышают  $\approx 20\%$ .

### Литература

1. Белогловский А.А., Верещагин И.П., Хренов С.И. Трехмерная математическая модель стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления и фотоионизации // Вестник МЭИ. 2011. № 3.

С.С. Гуляева, студ.; С.В. Гундарева, асп.;  
рук. А.Г. Темников, к.т.н, с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

## КОМБИНИРОВАННЫЙ КРИТЕРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВОСХОДЯЩИХ РАЗРЯДОВ С ЭЛЕМЕНТОВ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В ГРОЗОВОЙ СИТУАЦИИ

При оценке молниепоражаемости наземных взрыво- и пожароопасных объектов необходимо учитывать возможность формирования с них в грозовой ситуации не только восходящих встречных лидерных разрядов, но и незавершенных стримерных разрядов, которые могут контактировать с взрывоопасной областью над объектом.

Предлагаемый комбинированный критерий формирования восходящих встречных разрядов в грозовой ситуации рассматривает для элементов объекта, контактирующих в атмосфере с взрывоопасной смесью, стадию лавинно-стримерного перехода, а для молниеотводов и элементов, не контактирующих с взрывоопасной смесью, стадию стример-лидерного перехода. При этом учитывается, что осуществление рассматриваемых переходов в заданных грозовых условиях имеет вероятностный характер.

Условие стример-лидерного перехода заключается в расчете заряда  $Q_{сог}$  импульсной вспышки стримерной короны у элементов объекта (молниеотвода) и последующем определении вероятности ее преобразования в восходящий лидер по экспериментальным данным, полученным с помощью искусственных грозовых облаков [1].

Для определения успешности лавинно-стримерного перехода используется подход, включающий в себя расчет напряженности электрического поля на поверхности элемента объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью [2]. В этом случае вероятность перехода электронной лавины в положительный стример определяется как:

$$P_{str}(E) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(S \frac{E - E_{кр}}{E_{кр}}\right)}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности элемента конструкции взрывоопасного объекта, контактирующего с взрывоопасной смесью в грозовых условиях;  $E_{кр}$  – значение напряженности электрического поля на поверхности элемента наземного объекта, при котором вероятность лавинно-стримерного перехода составляет 0,5;  $S$  – параметр, определяемый экспериментально, например  $S = 45$  [2].

### Литература

1. Темников А.Г., Гундарева С.В., Калугина И.Е., Герастенок Т.К. О критерии возникновения восходящего лидера с наземных объектов // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. Вып. 3.
2. Fridman A. Plasma Chemistry // Cambridge University Press, 2008.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА**

Воздействие атмосферного электричества и молнии на носовые обтекатели самолетов и находящееся под ними оборудование остается одной из причин авиационных происшествий. Несмотря на присутствие молниеотводов, существенно уменьшающих вероятность прямого удара молнии в оборудование под обтекателем, остается открытым вопрос о характере разрядного и/или электромагнитного воздействия на него при ударе молнии в молниеотвод [1]. Специфика и интенсивность такого воздействия может определяться несколькими факторами:

а) формой и параметрами импульса тока финальной стадии молнии;

б) разрядными процессами по поверхности и внутри обтекателя за счет накопившегося там поверхностного заряда.

Для определения формы характерных импульсов тока финальной стадии при ударе в молниеотводы на обтекателе, их отличия от параметров разряда молнии при отсутствии диэлектрического обтекателя были проведены экспериментальные исследования разрядных процессов в промежутке «искусственное грозовое облако – модель молниеотвода» при наличии модели обтекателя и при его отсутствии.

Анализ более 500 осциллограмм тока финальной стадии разряда выявил шесть характерных форм импульса тока. Без модели обтекателя импульс тока в 31 % случаев имеет форму одиночного униполярного импульса со средними значениями амплитуды и крутизны 31,7 А и 1,4 кА/мкс соответственно. При наличии диэлектрического обтекателя, импульс тока финальной стадии разряда в 38 % имеет форму двойного импульса, второй импульс напоминает одиночный униполярный импульс, а первый импульс имеет в среднем на порядок большую крутизну и на порядок меньшую длительность.

Таким образом, наличие диэлектрического обтекателя влияет на параметры финальной стадии разряда, что необходимо учесть при проектировании электромагнитной совместимости радионавигационного оборудования, находящегося под носовым обтекателем самолетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-01000-а).

### **Литература**

1. **Uman M.A., Rakov V.A.** The interaction of lightning with airborne vehicles // Progress in Aerospace Sciences. 2003. Vol. 39.

*А.И. Коваленко, асп.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Как правило, при исследовании электромеханических переходных процессов (ЭМП) генераторов средней и большой мощности активные сопротивления обмоток генератора, так же как и активное сопротивление других элементов сети, например линий связи, трансформаторов, зачастую не учитывается в силу их малого значения [1]. Таким образом, потерями в активных сопротивлениях сети пренебрегают, так же как и не учитывается, например, потребляемая системой возбуждения мощность.

Вышеуказанные допущения справедливы для машин средней и большой мощности, однако, это не всегда дает достаточные результаты при расчетах и приходится учитывать влияние потерь [2], особенно это актуально для генераторов малой мощности, при исследовании ЭМП которых следует учесть следующее:

- активную составляющую сопротивления обмоток генератора;
- активную составляющую сопротивления кабельных линий;
- небольшие значения постоянной инерции  $T_j$  агрегата.

Таким образом, при возникновении КЗ вблизи генератора и наличии значительной по величине активной составляющей сопротивления отклонение скорости вращения генератора будет иметь меньшее значение по величине, а в ряде случаев и отличаться по знаку. Это объясняется уменьшением разности между механической мощностью турбины и электрической мощностью генератора за счет присутствия потерь активной мощности на нагрев элементов сети. Также необходимо учитывать, что при значительной активной составляющей сопротивления в контуре протекания токов КЗ наблюдается тепловой спад тока. Рассмотренные выше аспекты учтены в расчетах, проведенных автором, и показывают пределы увеличения допустимого времени отключения КЗ, что важно учитывать при разработке алгоритмов противоаварийной автоматики.

### **Литература**

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985.
2. **Гуревич Е.Ю., Либова Л.Е., Окин А.А.** Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990.

*В.М. Королев, М.В. Коростелев, студенты;  
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Ускорение технического прогресса выявляет необходимость внедрения новых электроизоляционных материалов, а экономические соображения повышают требования, предъявляемые к надежности электрооборудования, что делает необходимым уже на стадии проектирования проводить оценку срока службы и качества изоляции высоковольтных кабелей. При нарушении качества изоляции в ней возникают неоднородности. Влияние неоднородности среды проявляется в виде вторичных источников, а именно: зарядов поляризации, так как при внесении диэлектрического тела в поле, созданное в вакууме зарядом  $q$ , диэлектрик поляризуется.

Произведен расчет распределения электростатического поля при различных конфигурациях неоднородности среды, по которым проведен анализ качества изоляции кабеля.

Расчет электростатического поля был разбит на два этапа.

Первый – были найдены все вторичные источники, действие которых эквивалентно влиянию неоднородной среды. Второй – по известным формулам было рассчитано электростатическое поле.

Проведено построение математической модели, в которой систему уравнений, описывающую электростатическое поле в неоднородной среде, привели к системе, характеризующей эквивалентное поле в вакууме, при этом были введены вторичные источники (поляризационные заряды  $\rho_p$ ) [1]. Данная математическая модель существенно облегчает задачу, сводя ее к отысканию распределения вторичных источников, обычно локализованных в пространстве. Поэтому число неизвестных уменьшается, а точность возрастает. Если среда кусочно-однородная, то преимущество данной модели проявляются особенно сильно, поскольку в этом случае вторичные источники расположены только на границах раздела сред.

По распределению напряженности электрического поля можно судить о качестве изоляции как в начале эксплуатации, так и в ее процессе.

### **Литература**

1. **Тозони О.В.** Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975.

*Д.А. Кочетов, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;  
М.А. Кошелев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

## **ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОГО ИМПЕДАНСА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ НА ПАРАМЕТРЫ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

К числу наиболее эффективных методов диагностирования высоковольтной изоляции относятся методы диагностики по частичным разрядам, которые позволяют выявлять локальные дефекты на ранней стадии развития. Эти методы нашли широкое применение как в лабораторных условиях, так и в условиях эксплуатации. Основным методом диагностики частичных разрядов является электрический метод. Этот метод позволяет оценить интенсивность частичных разрядов [1]. При контроле состояния действующего электрооборудования по частичным разрядам возникают трудности, обусловленные наличием разного рода помех. В лабораторных условиях, при проведении измерений электрическим методом, уровень помех значительно ниже, чем в условиях эксплуатации. Поэтому анализировать особенности контроля частичных разрядов в высоковольтной изоляции предпочтительнее в лабораторных условиях.

Частотная характеристика импульса частичного разряда – важный параметр, с помощью которого можно идентифицировать частичные разряды в изоляции высоковольтного оборудования [2, 3].

Для определения влияния частотной характеристики активного импеданса на регистрируемые импульсы частичных разрядов электрическим методом, был собран измерительный контур и проведены измерения для различных электродных систем, а так же для дефектного высоковольтного ввода. В среде MatLab написан код для расчета характеристик частичных разрядов по осциллограммам. Произведена компьютерная обработка осциллограмм и разработаны рекомендации по выбору активного импеданса при измерении частичных разрядов электрическим методом.

### **Литература**

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений / под общ. ред. И.П. Верещагина. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Куффель Е., Цаенгль В., Куффель Дж.** Техника и электрофизика высоких напряжений. М.: Издательский дом «Интеллект». 2011.
3. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. 1979.

*Л.А. Кошкарева, студ.; рук. А.Г. Долгополов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ОТ ВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ**

Данная работа посвящена усовершенствованию и изучению релейной защиты от витковых замыканий в обмотках управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

Шунтирующие реакторы предназначены для контроля напряжения линии путем отбора реактивной мощности и разработаны для подключения к концам воздушных или кабельных линий высокого напряжения. Внешне маслонаполненные шунтирующие реакторы не сильно отличаются от силового трансформатора, но в действительности это не так. В управляемых шунтирующих реакторах (УШР), имеющих отдельную компенсационную обмотку, не представляется возможным проектировать основную дифференциальную защиту как у трансформаторов, для которых в зону ее действия включаются все обмотки, поэтому предусматриваются отдельные дифференциальные защиты (продольная и поперечная) сетевой обмотки (СО) и отдельно дифференциальная защита компенсационной обмотки (КО). Однако, также как и в трансформаторах, существенную опасность могут представлять витковые замыкания [1].

На первом этапе работы на базе микропроцессорных терминалов Siemens SIPROTEC были спроектированы защиты подстанции 200/110/10 кВ, на которой установлен УШР 220 кВ, а также спроектированы защиты данного шунтирующего реактора [2]. На основе полученных расчетов была оценена целесообразность установки и чувствительность защит УШР.

На втором этапе работы предполагается изучение разработанной ранее модели УШР: влияние предшествующей нагрузки, структуры и режима работы преобразователей ТМП, внешней дополнительной нагрузки на выводах КО на ток виткового короткого замыкания и чувствительность релейной защиты к витковым коротким замыканиям в обмотках реактора.

### **Литература**

1. **Zoran Gajic, Birger Hillström, Fahrudin Mekic.** Вопросы релейной защиты высоковольтных шунтирующих реакторов с точки зрения инженера релейной защиты. Вашингтон, 2003.
2. **Долгополов А.Г.** Релейная защита управляемых шунтирующих реакторов. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011.

*М.В. Краснова, студ.; рук. А.Г. Темников, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ОБ ОТКАЗЕ ОТ ТРОСОВОЙ ЗАЩИТЫ НА ВЛ 110–500 кВ**

Применение тросовой защиты на ВЛ 110 кВ и выше существенно снижает количество грозовых отключений и остается эффективным средством обеспечения молниезащиты ВЛ. В то же время наличие тросовой защиты увеличивает капитальные затраты на строительство ВЛ. В случае обрыва троса он сам может стать причиной аварии. Трос оказывает дополнительную нагрузку на опоры, ведя к ускоренному их износу. Плавка гололеда на тросах дороже и дольше. Таким образом, применение троса в качестве молниезащиты линий не всегда целесообразно [1].

В докладе представляются результаты технико-экономического анализа возможности отказа от тросов в зависимости от различных факторов.

Среди природных факторов, влияющих на принятие решения о применении или об отказе от тросовой защиты на ВЛ 110–500 кВ, ключевыми являются два: грозовая активность и характер местности, где проходит трасса ВЛ. В районах с грозовой активностью менее 40 часов в год на ВЛ 110–220 кВ в большинстве случаев можно отказаться от тросов. При прохождении ВЛ по пересеченной местности нельзя отказаться от тросовой защиты независимо от интенсивности грозовой деятельности.

Среди технических факторов выделяются следующие: тип опоры ВЛ, импульсная прочность изоляции и импульсное сопротивление заземлителя опоры. Наиболее существенное влияние оказывает величина импульсного сопротивления заземлителя опор. Когда оно превышает 25 Ом, число грозовых отключений для линий с тросами и без них отличается всего лишь в 2–3 раза. Поэтому при импульсном сопротивлении заземлителя более 30–35 Ом, можно отказаться от тросовой защиты на ВЛ в большинстве случаев.

Среди экономических факторов выделяются два: наличие резервирования потребителей электроэнергии и стоимость самой электроэнергии. Расчеты показали, что в случаях существенного резервирования (более 70–80 %) можно принимать решение об отказе от тросов. В случае существенного увеличения стоимости электроэнергии, ущерб от перерывов в электроснабжении также резко возрастает, и от тросов можно будет отказаться только в районах с низкой (менее 30 часов в год) грозовой активностью.

### **Литература**

1. **Дьяков А.Ф., Федосенко Р.Я.** Об эффективности грозозащитных тросов ВЛ // Электрические станции. 1991. № 9.

## АДАПТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПОТЕРИ ПИТАНИЯ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

На нефтеперекачивающих станциях (НПС) для выявления режимов нарушения электроснабжения широко применяются защиты от потери питания (ЗПП). Все режимы потери питания можно разделить на четыре группы: 1) нарушение электрической связи подстанции и источника питания, например, отключение одного из выключателей Q2 или Q6 в цепи питания от источника ИП1 (рис. 1); 2) короткое замыкание (КЗ) в цепи питания от одного из источников (точка К3); 3) КЗ в распределительной сети НПС (например, в точке К2); 4) КЗ в сети источника питания, не нарушающие связь технологического ЗРУ с источником питания (в точке К1). Недостатком применяемых на данный момент ЗПП является ограниченное быстродействие, что обусловлено жестким алгоритмом действия, не зависящим от причины нарушения электроснабжения.

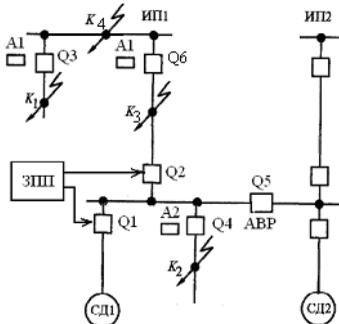


Рис. 1. Схема электроснабжения НПС

автоматического включения резерва, так и повысить безопасность синхронных двигателей (СД) при восстановлении напряжения в сети после его кратковременного исчезновения или глубокого снижения.

Для реализации адаптивных свойств ЗПП содержит вычислительный блок, который моделирует электрическую сеть и режимы работы электродвигателей подстанции.

Предложенные устройства ЗПП предназначены для установки в ячейках распределительных устройств трансформаторных подстанций, питающих крупные синхронные электродвигатели.

В работе рассмотрены алгоритмы действия ЗПП, позволяющие не только выявлять режим потери питания, но и определять причину, по которой произошло нарушение электроснабжения. Такой алгоритм действия ЗПП позволяет придать защите адаптивные свойства. При этом время срабатывания защиты становится зависимым от причины нарушения питания. Это позволяет повысить быстродействие отключения секции шин, потерявшей питание, и обеспечить как быстрое восстановление электроснабжения за счет

Э. Лхамсүрэн, асп.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

## **АКТУАЛЬНОСТЬ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОИСКА МЕСТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6–35 кВ В МОНГОЛИИ**

Линии электропередачи среднего напряжения 6–35 кВ электроэнергетической системы довольно часто подвергаются замыканию на землю. Суммарная протяженность сетей 6–35 кВ ЛЭП и их повреждаемость представлены в таблице.

№	Уровень напряжения ЛЭП	Протяженность [км]	Удельная повреждаемость в год [на 100 км]	Количество повреждений в год
1	35 кВ	4923	4	196
2	15 кВ	2450	5	120
3	10 кВ	16 540	19	3100
4	6 кВ	1240	3	37
5	Всего			3453

75 % повреждений воздушных линий передачи 6–35 кВ, которые находятся в собственности Монголии, составляют однофазные замыкания. Из данных таблицы можно оценить усредненное количество замыканий на землю ЛЭП 6–35 кВ в Монголии – около 2600 в год.

В энергосистеме Монголии аварийные отключения вызывают следующие негативные последствия:

Отключение системы управления семафорами Улан-Баторской железной дороги, что приводит к остановке движения поездов.

Недостаточная надежность одиночных ЛЭП 6–35 кВ, обеспечивающих крупные горнорудные и строительные предприятия, наносит значительный технико-экономический ущерб.

Отключение электронасосов в системе теплоснабжения в осенне-зимний период приводит к замерзанию труб теплоснабжения.

Как известно, для поиска мест замыкания на землю в ЛЭП 6–35 кВ дистанционные средства не отработаны, а известные топографические переносные указатели (Поиск, Волна, Квант) в электрических сетях Монголии нечувствительны из-за небольших значений емкостных токов, не превышающих 2 А.

Таким образом, вопрос создания топографических средств для определения мест замыкания на землю по показаниям стационарных и мобильных указателей на участке сети 6–35 кВ с увеличенным током замыкания является актуальной задачей для энергосистемы Монголии.

## РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА С ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАВИНОЙ В ВОЗДУХЕ

Цель работы состояла в расчете и анализе совместного распространения и взаимодействия катодонаправленного стримера с формирующейся перед его головкой электронной лавиной. Для этого использована диффузионно-дрейфовая математическая модель лавины и стримера [1] в ее трехмерной реализации [2], разработанной на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ». Расчеты выполнены для заполненного воздухом разрядного промежутка с однородным электрическим полем.

Показано влияние взаимодействия головки стримера с лавиной на ее параметры – скорость распространения, радиус, напряженность поля в ней.

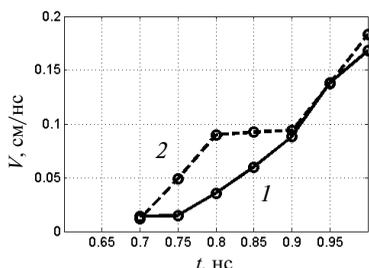


Рис. 1. Изменение во времени скорости распространения одиночного стримера 1 и стримера, взаимодействующего с лавиной 2, в поле с напряженностью 80 кВ/см

Это обусловлено тем, что развитие лавины перед головкой обеспечивает предварительную ионизацию газа: эта область оказывается заполненной свободными электронами, положительными и отрицательными ионами с более высокой концентрацией, чем это имеет в случае стримера, развивающегося в неионизированном предварительно пространстве. Это в свою очередь облегчает продвижение его головки вглубь промежутка.

Пример зависимости от времени  $t$  скорости  $v$  распространения стримерной головки для одиночного стримера и стримера, взаимодействующего с лавиной, показан на рис. 1. Появление лавины перед головкой стримера обеспечивает увеличение скорости последней по сравнению со скоростью головки одиночного стримера. После того как головка покидает предварительно ионизированную лавиной область, скорости стримеров в двух рассмотренных случаях сближаются.

Полученные данные важны для объяснения ветвления стримера.

### Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Белогловский А.А., Верещагин И.П., Хренов С.И.** Трехмерная математическая модель стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления и фотоионизации // Вестник МЭИ. 2011. № 3.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОДЕЛИ ОБМОТКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Целью данной работы является изучение резонансных перенапряжений, возникающих в обмотках трансформаторов, когда частота питающего напряжения совпадает с одной из собственных частот колебаний обмотки. Актуальность данной темы определяется тем, что в последнее время в эксплуатации отмечаются случаи повреждений силовых трансформаторов по причине резонансных перенапряжений в их обмотках.

Объект исследования – физическая модель непрерывной катушечной обмотки, содержащая 52 катушки по 10 витков в каждой. В модели обмотки сделаны промежуточные выводы от каждой второй катушки, что позволяет проводить измерения напряжений промежуточных точек обмотки. Исследование проводилось с помощью измерительного комплекса для частотного анализа реакции обмоток «Импульс-10», а также отдельных его элементов (генератора сигналов произвольной формы ГСПФ и цифрового осциллографа Bordo).

На исследуемой модели обмотки проведены измерения частотной характеристики и передаточных функций напряжений в обмотке для определения резонансных частот и наибольших кратностей перенапряжений, а также осциллографирование переходных процессов в обмотке при резонансных перенапряжениях.

Из полученных результатов следует, что при выполнении условий резонанса в обмотках возможно развитие перенапряжений с достаточно большими кратностями. Так, в исследуемой обмотке наибольшая кратность напряжения на первой собственной частоте в середине обмотки достигает восьми.

Процесс выхода резонансного повышения напряжения на установившийся уровень происходит экспоненциально с постоянной времени, соизмеримой с несколькими периодами собственной частоты обмотки. Для первой собственной частоты исследуемой обмотки постоянная времени примерно равна пяти периодам, а для второй и последующих собственных частот – свыше 10 периодов. Так как в эксплуатации воздействующие на трансформаторы при коммутационных перенапряжениях высокочастотные напряжения имеют затухающий колебательный характер, то полученные кратности напряжения являются предельными, поскольку могут и не быть достигнуты на практике с учетом затухания воздействующего напряжения.

*И.С. Николаев, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЭС**

Необходимым требованием для систем автоматического регулирования возбуждения является обеспечение устойчивости ЭЭС и качества переходного процесса. Для этого необходимо определять показатели качества процесса регулирования и сравнивать с допустимыми значениями [1, 2].

В данной работе различными методами дается количественная оценка показателей качества ПП, характеризующих работу АРВ.

Для получения экспериментальных данных в программе MatLab [3] составлена модель системы регулирования генератора с ПИД регулятором. В работе был произведен анализ переходных характеристик и частотных характеристик. Рассчитанные оценки параметров ПП сравнивались с максимально точными их значениями, получаемыми при точном математическом описании модели с использованием корней характеристического уравнения. В работе доказана возможность оценки показателей качества переходного процесса, на основе гипотезы об эквивалентности динамических свойств замкнутой системы регулирования произвольного порядка со свойствами колебательного звена второго порядка. При этом чтобы обеспечить в существенном диапазоне частот наиболее близкое совпадение АЧХ системы и модели, достаточно обеспечить совпадение трех параметров АЧХ: начальных значений, резонансных частот и максимальных значений, определяющих частотный показатель колебательности.

С помощью полученной модели становится возможным реальный контур регулирования, представляющий собой сложную динамическую систему высокого порядка, описать с достаточной точностью относительно простыми и удобными для ручного расчета формулами. Использование упрощенной модели и анализ ее АЧХ дает возможность получить аналитические выражения для двух главных показателей качества: перерегулирования и длительности переходного процесса. Полученные результаты позволяют упростить процесс расчета, снизить затрачиваемое время, уменьшить количество ошибок и могут быть использованы при проведении проверок АРВ.

### **Литература**

1. **Никулин Е.А.** Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
2. **Егоров К.В.** Основы автоматики и телемеханики: конспект лекций для студентов специальности ББД. М.: МПГУ (МИИТ), 1973.
3. **Черных И.В.** Simulink: Инструмент моделирования динамических систем.

*И.И. Педро, М.Н. Машковцева, студенты;  
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРОВОДЯЩЕЙ БУМАГЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ**

Внедрение новых электроизоляционных материалов делает необходимым уже на стадии проектирования производить оценку срока службы и качества изоляции. При нарушении качества изоляции в ней возникают неоднородности.

При конструировании установок необходимо знать распределение электростатического поля в изоляции с учетом неоднородности среды. Экспериментальное измерение потенциалов оказывается очень сложным из-за малых размеров и искажения полей при введении измерительного зонда [1].

Для преодоления этих трудностей используется моделирование с помощью проводящей бумаги. В качестве проводящей среды при моделировании электростатических полей используется электропроводная бумага (при изготовлении ее в целлюлозу вводят электропроводные частицы сажи или графита).

При соблюдении коэффициентов пропорциональность геометрических размеров и приложенного между электродами напряжения можно получить параметры реального электростатического поля. При моделировании используется проводящая бумага с различными удельными проводимостями  $\gamma$  для моделирования неоднородностей в изоляции и проводящий клей двух типов: для слабопроводящей среды и для проводников. При помощи проводящей бумаги можно исследовать и измерять электростатические поля в плоскости сечения пространственной конструкции, а также двухмерные (плоские) поля. Исследования сложных электроэнергетических процессов в электростатических полях на моделях находят все более широкое применение.

По изменению структуры электростатического поля можно судить о качестве изоляции [1], так как в местах дефекта изоляции появляются неоднородности, которые влияют на общую картину электростатического поля вблизи дефектов.

### **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.

А.Е. Пивоваров, М.В. Сальникова, студенты;  
рук. О.Н. Шелушенина, к.т.н., доц. (СамГГУ, г. Самара)

## ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА ДЛЯ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Кабельные распределительные электрические сети напряжением 6–10 кВ являются поставщиком электрической энергии потребителям, основным видом повреждений в которых являются однофазные замыкания на землю, переходящие в двухфазное короткое замыкание на землю.

Однофазные замыкания сопровождаются протеканием емкостных токов в неповрежденных фидерах. В ненаправленных защитах применяется отстройка по уровню тока  $3I_0$ , которая не изменяется в процессе эксплуатации. Однако емкостные токи зависят от количества подключенных фидеров. Таким образом, применяемые ненаправленные защиты срабатывают ложно.

Предлагаемое устройство осуществляет контроль снижения изоляционной стойкости кабельных линий 6 кВ с изолированной нейтралью. Устройство функционирует по принципу токовой направленной защиты и устанавливается на каждом фидере. Реагирующей величиной является соотношение между величинами  $3U_0$  и  $3I_0$ . Поэтому к устройству подводятся две величины: ток  $3I_0$  от трансформатора тока нулевой последовательности, и напряжение  $3U_0$  от трансформатора напряжения, обмотки которого соединены в разомкнутый треугольник.

Любое нарушение изоляции может быть представлено в виде активного сопротивления. Выделяется активная составляющая тока  $3I_0$  данного фидера, сдвинутая относительно напряжения  $3U_0$  данной секции 6 кВ на треть периода. После чего вычисляется интегральная сумма мгновенных значений произведения  $3U_0$  и сдвинутого  $3I_0$  (обозначим ее как  $P_s$ ). Затем вычисляется интегральная сумма квадратов мгновенных значений  $3i_0(t)$  (обозначим ее как  $\varphi^2$ ). Величина активного сопротивления, характеризующая повреждение на контролируемом фидере, определяется как отношение интегральных сумм  $\varphi^2$  к  $P_s$  за интервал наблюдения. В случае если повреждение находится на соседнем фидере, то величина указанного соотношения будет иметь отрицательное значение за интервал наблюдения. Интервал наблюдения кратен периоду промышленной частоты.

В предлагаемом устройстве проводится восемь замеров мгновенных значений  $3i_0(t)$  и  $3i_0(t)$  за период промышленной частоты, выполняются вычисления, результат отображается на ЖК дисплее в единицах, пропорциональных активному сопротивлению в месте повреждения. Поврежденный фидер будет иметь наименьшее положительное значение вычисленного сопротивления.

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

В целях проведения лабораторных испытаний и калибровки электронного детектора молний разработан и изготовлен высоковольтный генератор, позволяющий получать на выходе устройства серии искровых разрядов длиной до 60 мм, а также создавать постоянное электрическое поле высокой напряженности порядка 50 кВ/м.

Схема высоковольтного генератора (рис. 1) представляет собой блокинг-генератор, построенный на электронной лампе 6ПЗ6С (VL1), модернизированном телевизионном трансформаторе строчной развертки ТВС-110ЛА (T2) и умножителе напряжения УН9/27-1,3 (E1).

В блокинг-генераторе сильная положительная обратная связь вызывает при формировании переднего фронта и спада импульса лавинообразное нарастание и уменьшение силы тока в электронной лампе [1]. Длительность импульса в основном определяется временем заряда конденсатора C3 большой силой тока, протекающего в цепи управляющей сетки во время формирования вершины импульса, и параметрами трансформатора T2, а длительность промежутков между импульсами (в автоколебательном режиме) – временем разряда конденсатора C3 через резистор R3. Длительность импульса можно регулировать в некоторых пределах (0,05–25 мкс) изменением емкости конденсатора C3.

Основные достоинства данной схемы: простота устройства, легкая синхронизация и стабилизация колебаний, возможность получения большой мощности в импульсе при малой мощности потребления [2].

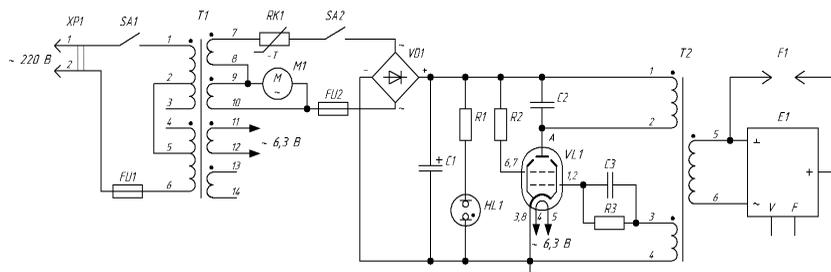


Рис. 1. Схема высоковольтного генератора

### Литература

1. Меерович Л.А. Импульсная техника. М.: Сов. радио, 1953.
2. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Преобразователи напряжения. М.: Альтекс-А, 2002.

## **РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Развитие современной электроэнергетики неразрывно связано с выявлением и решением многих сложных проблем. Одной из таких актуальных проблем являются системные низкочастотные колебания (НЧК), так как они приводят к снижению статической и динамической устойчивости и, как следствие, к нарушению параллельной работы и возникновению асинхронного режима [1]. На сегодняшний день важной задачей становится определение причин возникновения НЧК.

Данная работа посвящена изучению возможности влияния периодически изменяющейся нагрузки на появление и усиление НЧК в энергосистеме. В ней произведен обзор и анализ энергоемкого оборудования, имеющего периодический характер потребления мощности, и подробно рассмотрены несколько примеров соответствующего оборудования из разных отраслей производства, таких как: добыча нефти и газа, металлургия и машиностроение. Стоит отметить, что в современных статьях, посвященных проблемам НЧК, и научно-технической литературе, периодически изменяющаяся нагрузка не рассматривалась в качестве непосредственного источника, приводящего к возникновению НЧК, или как воздействие, усиливающее НЧК, когда собственный период изменения мощности нагрузки совпадает с периодом уже имеющихся НЧК в системе.

В статье представлены результаты проведенного в программном комплексе MatLab исследования влияния параметров каналов стабилизации АРВ на работу синхронного генератора под воздействием внешних периодических возмущений. В качестве тестовой применяется модель энергосистемы, соответствующая стандарту организации ОАО «СО ЕЭС»[2].

Результаты исследования подтверждают возможность усиления НЧК при резонансе периодически изменяющейся мощности нагрузки и уже имеющихся НЧК в системе.

### **Литература**

1. **Захаров Ю.П.** Идентификация низкочастотных колебаний в электроэнергетической системе и оценка участия синхронного генератора в их демпфировании: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013.
2. **СТО 59012820.29.160.20.001–2012.** Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов: Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС», утвержден 03.04.2012.

## РАБОТА УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОМ СКОЛЬЖЕНИИ

Целью данного доклада является рассмотрение вопроса определения допустимого значения скольжения, при котором возможна надежная ликвидация асинхронного режима (АР) различными типами существующих устройств автоматики ликвидации асинхронных режимов (АЛАР), контролирующих наличие электрического центра качаний (ЭЦК) на защищаемом участке.

Существуют два типа устройств, позволяющих выявлять наличие АР с ЭЦК на контролируемом участке – это АЛАР, фиксирующий изменение сопротивления в цикле АР, и АЛАР, фиксирующий повышение фазового угла (ФПФУ) на контролируемом участке энергосистемы.

В настоящее время при нарушении устойчивости энергосистем АР развиваются с большими значениями скольжения, соответственно ужесточаются требования к современным устройствам АЛАР. Данные требования находят свое отражение в действующей нормативной документации, согласно которой АЛАР должна выявлять АР со скольжениями до 10 Гц.

В работе определяются предельные значения скольжения, при которых обеспечивается устойчивая работа устройств АЛАР, указанных типов, а также рассматривается влияние относительной электрической длины контролируемого участка сети. На рис. 1 представлена зависимость угла между напряжениями на концах контролируемого участка ( $\delta_{12}$ ) при асинхронном провороте ( $\delta$ ) в зависимости от его относительной электрической длины ( $\lambda$ ), которая показывает увеличение скорости изменения контролируемых параметров при уменьшении относительной электрической длины.

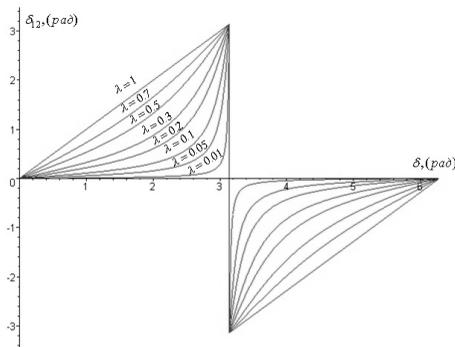


Рис. 1. Поведение угла между напряжениями на концах контролируемого участка при асинхронном провороте

*М.А. Свиридов, асп.; рук. В.С. Ларин, к.т.н. (НИУ «МЭИ», ФГУП ВЭИ)*

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАКЕТА ГЛАВНОЙ ВОЗДУШНО-БАРЬЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

В последнее время в мире имеется тенденция к ужесточению экологических требований, требований к взрыво- и пожаробезопасности. Наиболее полно этим требованиям соответствуют сухие трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией, которые, как правило, применяют на классы напряжения 6–35 кВ, что связано с низкой электрической прочностью атмосферного воздуха, являющегося основной изоляцией этих трансформаторов.

В мире активно ведутся работы по повышению класса напряжения сухих трансформаторов свыше 35 кВ. Одной из основных задач при разработке сухого трансформатора на столь высокое напряжение является обеспечение требуемой электрической прочности изоляции.

В ФГУП ВЭИ проведены испытания электрической прочности макета главной воздушно-барьерной изоляции обмоток при воздействии напряжения промышленной частоты. Макет содержит обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений; обмотка НН – цилиндрическая, намотана неизолированным проводом; обмотка ВН – катушечная, содержит 24 катушки; верхний край обмотки ВН экранирован неизолированным емкостным кольцом. Основные радиальные и осевые размеры макета соответствуют фактическим размерам сухих трансформаторов класса напряжения 35 кВ и выше.

На макете проведены испытания при различных значениях вылета барьеров над обмотками ВН и НН (0, 30 и 50 мм) и фиксированном расстоянии между обмотками (100 мм). Методика проведения испытаний включала исследование динамики развития разряда с помощью дефектоскопа «Филин – 6» и испытание одноминутным переменным напряжением (ступенчатый подъем с выдержкой 1 мин и паузой между ступенями 3–5 мин).

По итогам испытаний получены значения среднеразрядного напряжения воздушно-барьерной изоляции от вылета барьера над обмотками и установлено, что в исследованном диапазоне значений параметров макета среднеразрядное напряжение с увеличением вылета барьеров над обмотками изменяется практически линейно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Государственному Контракту № 16.526.12.6010 «Разработка экологически чистых силовых трансформаторов 110 кВ с воздушно-барьерной изоляцией».

А.С. Симонов, Я.В. Морыженков, студенты;  
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ФРЕДГОЛЬМА ВТОРОГО РОДА С ПОЛЯРНЫМ ЯДРОМ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Расчет электростатического поля в неоднородной среде помогает контролировать качество и оценивать срок службы изоляции высоковольтных кабелей. Расчет в неоднородной среде сводится к расчету электростатического поля в кусочно-однородной среде.

Предлагаемый далее метод расчета электростатического поля не только увеличивает точность и ускоряет процесс решения, но и обеспечивает его алгоритмом решения задачи. Для кусочно-однородной среды задачу расчета электростатического поля можно сформулировать в виде системы линейных интегральных уравнений Фредгольма второго рода с полярным ядром [1] относительно поверхностной плотности вторичных источников поля.

$$\sigma_{(x)} + \lambda \iint_S \sigma_{(x)} \times K_{(x,y)} dS_y = f_{(x)}, \quad x \in S. \quad (1)$$

Для решения данной системы воспользуемся численным методом решения интегрального уравнения второго рода основанным на устранении из поверхности  $S_\varepsilon$  – окрестности особой точки [2]. Если для поверхности существует параметрическое представление,

$$(\varphi, \upsilon) \in D \rightarrow S, \quad D \subset R^2. \quad (2)$$

То в результате преобразования получим матричное уравнение относительно плотности вторичных источников  $\sigma_{(x)}$  поля параметрической сетки  $(\varphi, \upsilon) \in D$

$$[\varphi_i, \varphi_{i+1}] \times [\upsilon_i, \upsilon_{i+1}] \rightarrow U_{\chi_i}^\varepsilon. \quad (3)$$

Следовательно, расчет проводится методом вторичных источников, который предназначен для исследования электростатических полей в неоднородной среде. По рассчитанному распределению напряженности электрического поля можно судить о качестве и процессах, протекающих в изоляции как в начале эксплуатации, так и в ее процессе.

### Литература

1. **Тозони О.В.** Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975.
2. **Владимиров В.С.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1975.

*Д.И. Скворцов, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;  
Е.М. Тимофеев, менеджер (НИУ «МЭИ»)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ, СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

В настоящее время роль топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в России становится более значимой. Он является жизнеобеспечивающим фактором для всех отраслей экономики страны. Высокие показатели работы организаций, осуществляющих свою деятельность в данной сфере, напрямую зависят от подготовки, подбора и управления человеческими ресурсами. Для достижения поставленных целей и получения качественных результатов работы предприятиям необходима сбалансированная и правильно построенная система подбора и управления персоналом, обеспечивающая их профессиональными кадрами [1, 2].

В работе было проведено исследование, включающее сбор, сравнение и анализ систем управления персоналом нескольких организаций ТЭК. В ходе исследования проведены беседы, опросы и анкетирование экспертов из высшего руководящего состава отобранных организаций. В рамках бенч-маркинга кадровой политики организаций были выявлены признаки, по которым определены показатели и критерии оценки рассматриваемых систем управления персоналом, в частности, компетентность, периодика обучения, скорость передачи управленческой информации, количество ступеней согласования инициатив, коммуникационные составляющие и другие показатели.

В результате исследования была разработана система сбалансированных показателей (ССП), учитывающая современную стратегию развития ТЭК и позволяющая рассматривать рекомендации по улучшению системы управления персоналом. Полученная СПП является новым инструментом для организаций ТЭК, дающим возможность разработать обоснованные рекомендации по совершенствованию концепции кадровой политики, которая сложилась на предприятиях в настоящее время, что представляет интерес при составлении различных стратегий развития системы управления персоналом.

### **Литература**

1. **Дьяков А.Ф.** Менеджмент и маркетинг в электроэнергетике. М.: Издательство МЭИ, 2007.
2. **Итоги** III Всероссийской кадровой конференции ТЭК России [[http://hrenergy.ru/?page\\_id=1443](http://hrenergy.ru/?page_id=1443)]. – Режим доступа: <http://hrenergy.ru/>, свободный.

*К.А. Смагин, Е.М. Тимофеев, аспиранты;  
рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., с.н.с.; И.П. Верещагин, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОЛЯ УНИПОЛЯРНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ «РЯД ПРОВОДОВ МЕЖДУ ПЛОСКОСТЯМИ»**

Система электродов «ряд проводов между плоскостями» является характерной для пластинчатых электрофильтров, улавливающих золу тепловых электростанций. Этому вопросу посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. В основном они были связаны с разработкой приближенных аналитических методов расчета [1, 2].

Несмотря на большое количество численных и аналитических методов расчета отсутствуют сведения о том, какие из них обладают необходимой точностью и удобны в инженерном применении.

Для расчетов по математической модели коронного разряда [1], включающей уравнение Пуассона и уравнение неразрывности плотности тока, применялись метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных объемов (МКО), метод характеристик (МХ). Для оценки качества результатов использовались обобщенные распределения плотности тока коронного разряда по плоскости.

В результате расчетов и анализа полученных данных был сделан ряд выводов. Распределения напряженности в расчетной области практически совпадают во всех методах расчета. МКО и МКЭ приводят к качественно неверному распределению плотности объемного заряда в области между проводами. Единственным методом, дающим верное распределение в указанной области, является МХ. Среди приближенных аналитических методов наилучшее приближение к реальным результатам дает метод разложения в ряд.

Для численных расчетов поля коронного разряда в системе «ряд проводов между плоскостями» рекомендуется использовать МКО или МКЭ для решения уравнения Пуассона и МХ для решения уравнения неразрывности.

### **Литература**

1. **Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М.** Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974.
2. **Верещагин И.П., Семенов А.В.** Электрические поля в установках с коронным разрядом. М.: МЭИ, 1984.

*Д.М. Стешенко; асп.; рук-ли Б.К. Максимов, д.т.н., проф.;  
А.А. Волошин, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЗА**

Целью настоящего доклада является рассмотрение отечественного [1] и зарубежного [2] опыта использования технологий интеллектуального анализа данных (ИАД) при создании систем анализа данных аварийных событий и экспертных систем поддержки принятия решений в энергетике.

В общем случае под интеллектуальным анализом данных (Data Mining) понимается процесс выявления скрытых закономерностей или взаимосвязей между переменными в больших массивах необработанных данных [3].

В докладе рассматривается возможность использования мультиагентной технологии и нейронных сетей при создании экспертной системы анализа аварийного события в целях формирования экспресс-протокола параметров аварийного события и функционирования устройств РЗА.

На основе анализа показано, что разрабатываемая система может быть использована в качестве одной из составляющих информационной поддержки деятельности диспетчерского и оперативного персонала при ликвидации технологических нарушений на объектах электроэнергетики и анализе функционирования устройств РЗА, а также сформулированы основные требования, предъявляемые к создаваемой системе. В качестве источников информации об аварийном событии для данной системы выступают:

- устройства РЗА (осциллограммы в формате COMTRADE, файлы параметрирования, журналы событий и срабатывания, результаты ОМП и текстовые отчеты регистраторов аварийных событий);
- SCADA-система (телесигналы и телеизмерения).

### **Литература**

1. **Любарский Ю.Я., Мирошкин А.Г.** Экспертная система диспетчерского экспресс-анализа нештатных ситуаций на подстанции // Энергетик. 2012. № 4.
2. **Henaio F., Amaya J., Jaramillo R., Monterrosa F.** An Expert System (ES) to Evaluate and Characterize Faults in Transmission Lines Using Case-Based Reasoning (CBR) // IEEE Transaction on PowerSystems. 2008. № 3.
3. **Слесарев Е.В., Тесля В.В.** Проблемы, тенденции развития и перспективные направления применения технологий Data Mining // Электроника и информационные технологии. 2011. № 2.

*В.О. Тазин, асп.; А.А. Волошин, к.т.н, ст. преп.;  
рук. Б.К. Максимов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИКИ ОПЕРАТИВНОЙ БЛОКИРОВКИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯМИ И ЗАЗЕМЛЯЮЩИМИ НОЖАМИ**

Как правило, управление и оперативная блокировка разъединителей и заземляющих ножей (ОБР), выполняются в виде жестко детерминированных алгоритмов, не позволяющих учитывать установку переносных заземлений и выполнения расшивки. Детерминированность алгоритмов и отсутствие адаптивности приводят также к необходимости вывода ОБР из работы при включении в работу энергообъектов в несколько пусковых этапов и в случаях вывода оборудования в ремонт [1].

В настоящее время в различных областях науки и техники большое распространение находит использование мультиагентных технологий. Электроэнергетика не является исключением [2]. Особенностью мультиагентных систем является то, что агент, имея неполную информацию об окружающей среде, необходимые данные получает в процессе общения с другими агентами, причем каждый агент самостоятельно инициирует запросы.

В докладе описана программная реализация адаптивной автоматики ОБР с применением мультиагентных технологий. Для конкретной подстанции внедряются индивидуальные агенты для каждого коммутационного аппарата, что позволяет учитывать специфику объекта. Каждый разъединитель или заземляющий нож имеет своего агента, обладающего информацией о состоянии соответствующего коммутационного аппарата и его местоположении в схеме подстанции. Все агенты находятся в одной среде, по своей структуре однотипны и обладают всеми необходимыми данными для реализации информационного обмена и формирования решения о запрете управления. Правила поведения агентов сводятся к универсальным правилам обмена сообщениями и не зависят от конкретной схемы распределительного устройства. Применение агентов исключает необходимость составления алгоритмов ОБР для каждого конкретного случая в зависимости от текущей конфигурации главной схемы энергообъекта.

### **Литература**

1. **ФСК ЕЭС.** Распоряжение № 236 «Об утверждении Порядка организации оперативной блокировки на подстанциях нового поколения». 2010.
2. **Janeth G. Gomez-Gualdr'on, Miguel V'elez-Reyes** A Multi-Agent Approach for a Self-Reconfigurable Electric Power Distribution System // Intelligent Computing: Theory and Applications IV, Proc. of SPIE Vol. 6229, 62290F, (2006).

*А.В. Танаев, В.А. Кучуков, В.М. Сальникова, студенты;  
рук. В.М. Мякишев, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

## **ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЕСЯ НАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

Технологические и аварийные отключения элементов в процессе эксплуатации энергосистемы возникают при высоких напряжениях и больших токах, что часто приводит к возникновению электрического разряда в виде дуги. Индикаторным методом (на основании теоремы Тевенена) определено, что в момент повторного возбуждения дуги скорость нарастания синусоидального тока может быть выражена как [1]:

$$\frac{di}{dt} = \text{const} . \quad (1)$$

Длительность повторного зажигания (время восстановления напряжения) весьма мало по сравнению с периодом тока, поэтому участок синусоиды тока вблизи нуля заменяется прямой [2].

Практический интерес представляют динамические параметры источника питания. На примере упрощенной схемы замещения сварочного трансформатора нами был рассмотрен переходный процесс, возникающий при повторном возбуждении дуги и моделирующийся размыканием ключа  $K$  (полагается скачкообразное изменение сопротивления столба дуги). В результате получили, что на характер процесса восстановления напряжения существенное влияние оказывает коэффициент связи « $K$ ». Анализ процесса восстановления напряжения позволяет оценить динамические свойства источников питания [1, 3].

Индикаторный метод обследования системы источник питания – электрическая дуга приемлем для анализа процессов повторного возбуждения электрической дуги. Динамические параметры системы источник питания – электрическая дуга удобнее определить по параметрам восстанавливающегося напряжения источника питания, а дуговые процессы характеризовать постоянной времени.

### **Литература**

1. **Залесский А.М.** Электрическая дуга отключения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. **Мякишев В.М.** Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. Самара: СамГТУ, 2010.
3. **Лесков Г.И.** Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970.

*Г.А. Филатова, асп.; рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ ПО ПАРАМЕТРАМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА**

Для кабельных сетей 6–10 кВ до сих пор не существует реально используемых эффективных методов дистанционного определения места однофазного замыкания на землю (ОМЗЗ) на линиях, находящихся под рабочим напряжением. Для задач определения места (зоны) однофазных, в том числе самоустраивающихся, замыканий на землю могут быть использованы электрические величины переходного процесса, возникающего во время пробоя изоляции.

Исследование электромагнитных переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в сетях 6–10 кВ проводилось на упрощенных моделях электрических сетей. Для выявления информационных параметров, которые можно использовать для решения задачи дистанционного ОМЗЗ, использовалось аналитическое решение уравнений переходного процесса на основе двухчастотной схемы замещения [1] и моделирование на ЭВМ.

Для решения задачи ОМЗЗ могут быть использованы величины, параметры которых зависят от удаленности до места повреждения. К таким величинам относятся, в частности, переходный ток нулевой последовательности и его свободные составляющие и переходное напряжение нулевой последовательности и его свободные составляющие. От удаленности до места повреждения зависит также ток в поврежденной фазе поврежденного присоединения и напряжение на поврежденной фазе.

Для исключения зависимости информационных параметров от начальной фазы пробоя изоляции для решения задачи ОМЗЗ должно использоваться нормирование значений свободных составляющих тока и напряжения с учетом напряжения на поврежденной фазе в момент возникновения ОЗЗ.

Исследовалось влияние факторов, искажающих замер информационных параметров, основными из которых являются переходное сопротивление в месте повреждения, суммарный емкостный ток сети и др. Как показали расчеты по двухчастотной схеме замещения и исследования на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, наиболее устойчивыми информационными параметрами, практически не зависящими от влияния указанных выше факторов, являются начальное значение производной нормированного переходного тока поврежденной фазы или тока нулевой последовательности поврежденной линии, а также начальные значения первой производной напряжения на поврежденной фазе и второй производной напряжения нулевой последовательности.

### **Литература**

1. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. 1991. № 10.

*Т.Е. Шадриков, асп.; рук-ли А.В. Гусенков, к.т.н., доц.;  
А.М. Соколов, д.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Наиболее актуальной задачей современной электроэнергетики является сокращение потерь электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении. Этому способствуют, с одной стороны, ужесточающиеся нормативы в области сокращения потерь, с другой – развитие отрасли силовой полупроводниковой техники [1].

Одним из эффективных способов борьбы с потерями электроэнергии в электропередачах является применения несинусоидального напряжения и силового высоковольтного оборудования повышенной частоты для передачи и распределения электроэнергии. Для этого требуется разработка и создание высоковольтных силовых трансформаторов и кабельных линий электропередач повышенной частоты. Важно так же учитывать технико-экономические параметры таких электропередач по сравнению с традиционными электропередачами промышленной частоты [2]. При создании экспериментальной модели линии электропередачи непромышленной частоты были получены осциллограммы напряжения на высоковольтной обмотке повышающего трансформатора при его работе в режимах холостого хода и в режиме номинальной нагрузки. Форма импульсов соответствует трапецеидальной со сверхвысокочастотными выбросами на амплитуде фронта. Для исследования природы возникновения таких выбросов была создана математическая модель, учитывающая Т-образную схему замещения высоковольтного трансформатора (с заданным активными и реактивными параметрами). Расчет напряжения на выходе трансформатора происходит с учетом преобразования Фурье и суммированием амплитуд отдельно взятых гармоник. Для реализации модели использован пакет прикладных программ MatLab.

Создание математической модели позволит глубже исследовать процессы в трансформаторе и электропередаче повышенной частоты.

### **Литература**

1. **Принципы** организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др. // Энергетик. 2014. № 3 и № 4.
2. **Шадриков Т.Е., Соколов А.М., Гусенков А.В.** Разработка методики оценки технико-экономических показателей высоковольтных силовых трансформаторов непромышленной частоты // Материалы докл. Национального конгресса по энергетике, 8–12 сентября 2014 г.: в 5 т. Т. 4. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014.

## **КОМПЛЕКСНЫЕ УСТРОЙСТВА АОСН**

В процессе аварии в ЕЭС России 25.05.2005 г., произошло снижение напряжения в сети 110 кВ до 85–90 кВ, приведшее к лавине напряжения. В результате этого произошло отключение большого числа потребителей.

Для предотвращения лавин напряжения применяется комплекс устройств автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН), позволяющий поддерживать необходимый уровень напряжения в заданных узлах электроэнергетической системы, что является актуальным и важным [1].

В настоящее время в российской электроэнергетике устройства АОСН устанавливаются на понижающих подстанциях и позволяют произвести мероприятия по ограничению снижения напряжения на шинах низшего напряжения, что является необходимым, но не достаточным для предотвращения такой системной аварии, как лавина напряжения [2, 3]. Вследствие таких аварий наносится значительный материальный ущерб.

В докладе прорабатывается одно из возможных решений данной проблемы – дополнительная установка комплексных устройств АОСН на электростанции. Такое решение позволяет не только замедлить развитие лавины напряжения, но и повысить вероятность ее предотвращения.

Таким образом, в докладе предлагается использовать двухуровневую систему устройств АОСН: подстанционную и станционную, что в комплексе позволит устранить несовершенство существующей системы АОСН в электроэнергетической системе России.

### **Литература**

1. **Алексеев О.П., Козис В.Л., Кривенков В.В.** Автоматизация электроэнергетических систем: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 1994.
2. **Аттестационные** требования к устройствам противоаварийной автоматики ПА: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-33.040.10.123-2012. Дата введения: 24.05.2012 г.
2. **Положение** о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС». Дата введения: 2011 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ – ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА .....	3
Секция 43. Котельные установки и охрана окружающей среды .....	5
Секция 44. Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС .....	26
Секция 45. Схемы и режимы работы тепловых электрических станций .....	49
Секция 46. Контроль, автоматизация и управление в энергетике .....	73
НАПРАВЛЕНИЕ – ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ .....	103
Секция 47. Энергетические установки и двигатели .....	105
Секция 48. Проблемы технологии, надежности и конструирования .....	138
Секция 49. Робототехнические и мехатронные системы .....	150
НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА .....	169
Секция 50. Электроэнергетические системы .....	171
Секция 51. Электроснабжение .....	199
Секция 52. Электрические станции .....	226
Секция 53. Возобновляемые источники энергии .....	245
Секция 54. Электрофизика и системы управления электроэнергетических объектов .....	271

*Научное издание*

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭНЕРГЕТИКА**  
**Двадцать первая Международная научно-техническая  
конференция студентов и аспирантов**

Тезисы докладов  
В 4 томах

Том 4

Корректоры *Г.Ф. Раджабова, В.В. Сомова*  
Компьютерная верстка и подготовка  
оригинал-макета *Л.В. Софейчук*

---

Подписано в печать 26.01.2015

Формат бумаги 60×84/16

Печать офсетная

Усл. п.л. 17,67

Тираж 300 экз.

Заказ

---

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14а  
Отпечатано в ППП «Типография «Наука», 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6