МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

АССОЦИАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОТДЕЛОВ ТЕХНИЧЕСКИХ
УНИВЕРСИТЕТОВ СТРАН ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ
(АМО)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРОНИКЕ США (IEEE) (студенческая секция)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

ДВАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

27 — 28 февраля 2014 г., Москва

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ТОМ
4

Москва Издательский дом МЭИ 2014

УДК 621.3+621.37[(043.2)]
Р 154

Р 154 РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (27—28 февраля 2014 г., Москва): Тез. докл. В 4 т. Т. 4. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 372 с.

ISBN 978-5-383-00890-4
ISBN 978-5-383-00894-2 (Том 4)

Помещенные в четвертом томе сборника тезисы докладов студентов и аспирантов российских и зарубежных вузов освещают основные направления ядерной энергетики и теплофизики, 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

Рогалев Н.Д. — ректор, председатель Оргкомитета
В.К. Драгунов — проректор по научной работе, сопредседатель
Т.А. Степанова — проректор по учебной работе, сопредседатель
Е.В. Бычкова — научный сотрудник кафедры АЭП, ответственный секретарь
С.А. Цырук — помощник проректора по научной работе
А.Е. Тарасов — начальник 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.Е. Смирнов — директор ИПЭЭф
С.В. Белоусов — директор ИМЭЭП
А.С. Федулов — директор филиала МЭИ в г. Смоленске
П.В. Шамигулов — директор филиала МЭИ в г. Волжский
С.А. Абдулкеримов — директор филиала МЭИ в г. Душанбе
Н.И. Файрушин — директор Энергетического колледжа (филиал МЭИ) в г. Конаково

ISBN 978-5-383-00890-4
ISBN 978-5-383-00894-2 (Т. 4)

© Авторы, 2014
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2014

Направление

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА

Научный руководитель направления —

директор ИТАЭ, д.т.н.,
профессор А.В. Дедов

Секция 39

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И УСТАНОВКИ

Председатель секции — зав. каф. АЭС, д.т.н., профессор В.Н. Блинков
Секретарь секции — вед. инженер Р.Х. Хасанов

А.А. Аствацатурова, студ.; рук. В.М. Зорин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДОГРЕВА ВОДЫ МЕЖДУ ПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ПТУ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Известно, что введение промежуточного перегрева пара турбины при неизменной мощности ППУ приводит к уменьшению мощности ЦВД и появлению индифферентной (к введению в ней дополнительного отбора пара в систему регенерации) точки в ЦНД. Следствием является целесообразность увеличения подогрева воды в регенеративном подогревателе, подключенном к выходу из ЦВД. Однако нам не известны публикации, освещающие влияние теплофикационной установки (ТфУ) в составе ПТУ на положение индифферентной точки.

Такие исследования были проведены на кафедре АЭС МЭИ с помощью компьютерной программы СХЕМА применительно к одному из первых проектов ПТУ К-1000-5,9/50 [2]. Расчеты показали, что учет ТфУ мощностью 100 МВт привел к увеличению на 20 % разности энтальпий пара $\Delta h_{\text{инд}}$ между входом в ЦНД и индифферентной точкой (рис. 1).

На рисунке приведены зависимости электрического КПД ПТУ $\eta_э$ от положения первого отбора пара из ЦНД (5-го отбора, считая от входа в турбину), определяемого разностью энтальпий пара на входе в ЦНД и первом отборе $\Delta h_{1\text{НД}} = h_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} - h_{1\text{НД}}$.

Пересечение кривой $\eta_э(\Delta h_{1\text{НД}})$ с горизонтальной штриховой линией, соответствующей значению $\eta_э$ при отсутствии первого отбора пара из ЦНД и подключенного к нему подогревателя определяет энтальпию в ин-

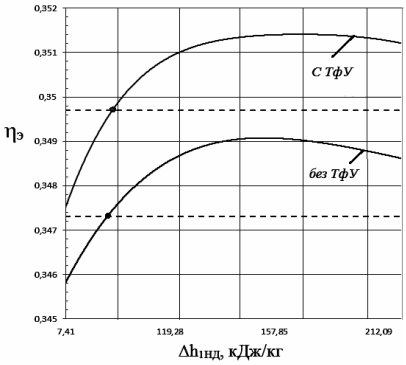


Рис. 1. Зависимость $\eta_э$ от $\Delta h_{инд}$

дифференртной точке; ее положение определяется разностью $\Delta h_{инд} = h_{цнд}^{вх} - h_{инд}$

Введение ТфУ увеличивает расходы пара из отборов ЦВД, и для компенсации снижения мощности ЦВД при меньшем расходе пара в ЦНД требуется увеличение $\Delta h_{инд}$.

В варианте без ТфУ значение $\Delta h_{инд}$, определенное по приведенному рисунку и по формуле из [1], различается примерно на 10 %, что говорит о влиянии допущений, сделанных при выводе формулы.

Литература

1. **Зорин В.М.** Атомные электростанции. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

2. **Цанев С.В. Тамбиева И.Н., Короткова Л.С.** Тепловые схемы и показатели конденсационных паротурбинных установок. М.: МЭИ, 1983.

Н.С. Вододохов, Ю.М. Лапин, студенты; рук. М.А. Скачек, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В настоящее время за продолжительный период эксплуатации АЭС скопилось колоссальное количество радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. К настоящему времени в мире накоплено около 300 тыс. т отработавшего ядерного топлива, а в России — около 20 тыс. т. Кроме того, только в российских пунктах хранения находятся более 500 млн $м^3$ жидких радиоактивных отходов и свыше 180 млн т твердых радиоактивных отходов. Хранение отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в принципе представляет потенциальную опасность для окружающей среды и населения [1]. Следовательно, радиоактивные отходы должны быть переработаны и окончательно и надежно удалены из сферы деятельности человека, а при длительном хранении ядерного топлива (до его переработки) должна быть обеспечена максимально возможная степень безопасности. В случае если переработка отработавшего ядерного топлива не предполагается, то оно также должно быть надежно захоронено.

За долгие годы существования атомной энергетики были предложены различные пути решения проблемы захоронения ядерных отходов. Данная проблема остается одной из самых актуальных на сегодняшний день. Мы рассмотрим наиболее рациональные, при этом не обделив вниманием альтернативные методы.

Нами был проведен анализ возможных путей разрешения проблемы захоронения радиоактивных отходов, рассмотрены варианты дальнейшего развития методов захоронения, сделан выбор наиболее успешных и рациональных вариантов выхода из сложившейся ситуации.

Литература

1. **Скачек М.А.** Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 448 с.

М.А. Вольман, асп.; рук. В.К. Семенов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОБУЧАЮЩИЕ ПРОГРАММЫ ПО НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО ТРЕНАЖЕРА

При загрузке топлива в ядерный реактор определяют и уточняют его нейтронно-физические и теплотехнические характеристики. Овладение техникой физического эксперимента на действующих реакторных установках является одной из важнейших задач при подготовке специалистов, их эксплуатирующих. Перспективным направлением в этой связи представляется разработка обучающих модулей, которые в качестве объекта исследования используют не реактор, а его математическую модель.

Функционально-аналитический тренажер (ФАТ) является электронной моделью энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320), реализованной на персональном компьютере в программной среде 3KeyMaster. В основе ФАТ лежит математическое моделирование нейтронно-физических, тепломеханических, теплофизических и других процессов и, как следствие, построение модели функционирования энергоблока в различных режимах. Широкие возможности ФАТ позволяют проводить эксперименты над активной зоной, моделировать различного рода штатные и аварийные ситуации. Мобильность и удобство при работе на персональном компьютере позволяют эффективно использовать ФАТ в учебном процессе.

Руководящие документы [1, 2] устанавливают объем, методики и порядок проведения физических экспериментов с целью определения нейтронно-физических характеристик ядерного энергетического реактора, требования к исходному состоянию реакторной установки (РУ) перед началом конкретного эксперимента, технические ограничения и меры по обеспечению ядерной безопасности, действия персонала в случае изменения состояния РУ, необходимого для проведения работ, а также критерии успешности и контроль правильности выполнения экспериментальных исследований. На основе этих документов разработаны методики проведения и обработки реакторных измерений на ФАТ, применение которых в учебном процессе позволяет решить проблему овладения техникой физического эксперимента и систематизировать знания, касающиеся работы основного оборудования энергоблока и принципов управления им.

Литература

1. **Методики расчета** нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000: РД ЭО 0151-2004 // Концерн «Росэнергоатом». М., 2005. — 101 с.

2. **Типовые программы и методики** проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000: РД ЭО 0150-2004 // Концерн «Росэнергоатом». М., 2005. — 273 с.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ КОРИУМА В ВОДЕ

Целью работы являлись разработка расчетной программы для анализа течения нескольких жидкостей со свободными границами на основе полунеявного метода движущихся частиц и применение этой программы для анализа термической фрагментации капли расплава в воде.

В работе выполнен обзор численных методов моделирования течений жидкостей со свободными границами, рассмотрен ход протекания тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР и показана роль термического взаимодействия кориума с водой. Также приведено описание полунеявного метода движущихся частиц, выполнен расчетный анализ процесса термической фрагментации расплава при его взаимодействии с водой и описаны основные закономерности этого процесса.

Выполнено численное моделирование процесса столкновения одной водяной струи с расплавом и двух водяных струй с расплавом, используя MPS метод [1]. Полученные результаты сопоставлены с двумя теоретическими моделями фрагментации капли расплава Kim-Corradini [2] и Ciccarelli-Frost [3]. Установлено, что проникновение струи воды, которое предполагается в модели фрагментации Kim-Korradini, в расчетах не наблюдалось.

Расчет столкновения двух водяных струй с поверхностью расплава показал, что образуются тонкие образования («нити»), как это предполагается в модели Ciccarelli-Frost. Если предположить, что плотность жидкости струи больше, чем плотность расплава, то образование таких «нитей» не происходит.

Литература

1. **Koshizuka S., Tamako H., Oka Y.** A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation // Comput. Fluid Dyn. 1995. Vol. 4. P. 29—46.

2. **Kim B., Corradini M.L.** Modeling of small-scale single droplet fuel:coolant interactions. Nucl. Sci. Eng. 1988. 16–28.

3. **Ciccarelli G., Frost D.L.** Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography // Nucl. Eng. Des. 1994. Vol.146. P. 109—132.

А.Е. Евсин, А.В. Грунин, А.С. Каплевский, аспиранты, А.А. Гордеев, соиск.; рук. Л.Б. Беграмбеков, д.ф.-м.н., проф. (НИЯУ «МИФИ»)

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ НА ВОДОРОДОСТОЙКОСТЬ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Детали из циркониевых сплавов, используемые в качестве элементов активных зон легководных ядерных реакторов, в процессе работы реактора подвергаются коррозии и наводороживанию, что является причиной их преждевременного выхода из строя [1]. Неотъемлемой частью разработки сплавов и защитных покрытий, стойких к наводороживанию, является проведение испытаний образцов в условиях, приближенных к условиям активной зоны.

Современные методы тестирования циркониевых сплавов и защитных покрытий на них на коррозионную стойкость и водородостойкость предполагают выдержку образцов в водных автоклавах или пароводяных стендах [2, 3]. Данные методы являются крайне малопроизводительными из-за необходимости проведения длительных испытаний.

В работе предлагается метод ускоренных испытаний циркониевых сплавов с защитными покрытиями на водородостойкость, при котором образцы облучаются ионами водородной плазмы. Обоснованность использования плазменного облучения в качестве альтернативы длительной выдержке в паре подтверждается идентичностью положения максимумов и подобием формы спектров термодесорбции водорода из образцов, испытанных обоими методами. За 90 мин облучения образца циркониевого сплава Э110 (ионы D_2^+, энергия 500 эВ/ат, плотность потока ионов $4 \cdot 10^{15}$ см$^{-2} \cdot$с$^{-1}$) в образец захватывается примерно столько же атомов водорода, сколько при выдержке в пароводяном стенде (температура пара 400 °С, давление ~1 атм) в течение 1100 ч. Для изучения совместного действия процессов коррозии и наводороживания возможно облучение образцов ионами водородной плазмы с примесью кислорода.

Авторы работы лично проектировали и собирали экспериментальное оборудование, проводили расчеты и эксперименты, принимали участие в планировании экспериментов, обсуждении и интерпретации результатов.

Литература

1. **Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г.** Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994.

2. **Choo K-.N., et al.** Oxidation and hydrogen uptake of Zr based Nb alloys at 400 °C under 10 MPa H_2O steam atmosphere // J. Nucl. Mater., 226 (1995). P. 9—14.

3. **Петельгузов И.А.** Влияние защитных покрытий из алюминия и хрома на окисление циркония и его сплавов // ВАНТ. 2012. № 2 (78). С. 114—119.

Д.А. Емельянов, асп.; рук. О.И. Мелихов, д.ф.-м.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛОЩАДИ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» на кафедре атомных электрических станций был сконструирован стенд для определения концентрации площади межфазной поверхности при подъемном течении водо-воздушной смеси в вертикальной трубе (рис. 1).

Мотивацией для создания подобного стенда и проведения на нем серии экспериментальных работ послужило желание расширить малое количество данных для верификации, посвященных данной тематике в отечественной и зарубежной литературе.

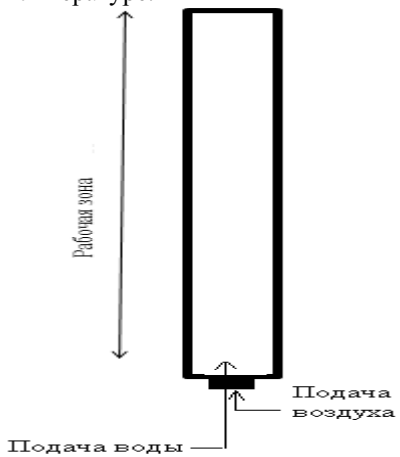


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Для достижения пузырькового режима воздух подавался в рабочую зону через специальную диафрагму. Эксперименты были обработаны методом фотосъемки.

Экспериментальные данные были использованы для верификации кодом CATEQ, что позволило детально проанализировать применимость существующих корреляций по переносу концентрации площади межфазной поверхности.

А.А. Ермолова, студ.; рук. В.П. Горбатых, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРИКЛАДНАЯ МЕТОДИКА КОРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ДИСЛОКАЦИОННО-ВОДОРОДНОЙ МОДЕЛИ

При конструировании металлоемкого оборудования АЭС строго соблюдаются требования нормативно-технической документации. На наработку до отказа оказывают негативное влияние множество частных процессов повреждения (ЧПП) как основных, так и сопутствующих. При этом в условиях эксплуатации кинетика каждого из них, как правило, нелинейна во времени и определяется не одним значимым параметром. Показана возможность создания параметрических моделей на примере водородного охрупчивания и усталости для оценки состояния и управления остаточным ресурсом конструкционных сплавов (КС). Предложен алгоритм вычисления кинетики роста общей меры повреждения для сочетания по крайней мере двух частных процессов повреждения (водородного охрупчивания и усталости).

Усталостное повреждение (мера повреждения по усталости МП$_У$) $a_У$, вычисляется по формуле

$$a_У = МП_У = \sum_{r=11}^{r} \frac{N_i}{[N_0]_i}, \qquad (1)$$

где N_i, $[N_0]_i$ — текущее и допускаемое числа циклов нагружения; r — порядковый номер сорта цикла нагружения; $r = 11$ — число режимов эксплуатации ПГ с параметрами, отличающимися от номинальных.

Мера повреждения по водородному охрупчиванию:

$$a_{ВО} = МП_{ВО} = C_H(\tau_i)/ C^{\lim}_{H_2}, \qquad (2)$$

где $C_H(\tau_i) = \kappa(\tau_{hi} + \Delta\tau_i)^{0,5}\exp(-q\, pH_i)$, $C_H(\tau_i) \le C^{\lim}_{H_2}$,

κ и q — константы, определяемые при обработке данных целевых ускоренных ресурсных опытов; τ_{hi} — вспомогательный параметр, имеет размерность экспозиции, необходимой для накопления такого же количества водорода $(C_H)_{i-1}$, как за весь предшествующий период эксплуатации, но при значении H_i;$C^{\lim}_{H_2}$ — предельной концентрации водорода в КС перед возникновением трещины.

Мера живучести будет равна Ж = 1 — МП.

Общая мера повреждения двумя ЧПП (усталость и водородное охрупчивание) будет равна:

МП = {МП$_{ВО}$ / 1 — МП$_У$} = МП$_{ВО}$/ Ж$_У$, если МП$_{ВО}$> МП$_У$, или Ж$_У$ > Ж$_{ВО}$,

МП = {МП$_У$ / 1 — МП$_{ВО}$} = МП$_У$/ Ж$_{ВО}$, если МП$_У$> МП$_{ВО}$, или Ж$_{ВО}$ > Ж$_У$

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ВИБРАЦИИ ГЛАВНЫХ ПАРОПРОВОДОВ АЭС С ВВЭР-1000

Показано, что одним из главных источников акустических колебаний, вызывающих вибрации главных паропроводов, являются колебания объема двухфазной среды в парогенераторе, частота которых зависит от уровня воды в парогенераторе (ПГ). Указан диапазон частот генерируемых колебаний давления при уровнях воды в ПГ, соответствующих нижнему и верхнему пределам регулируемого уровня. Показано, что для предотвращения резонанса частот колебаний рабочего тела в объемах, содержащих пар и пароводяную смесь в нескольких параллельно включенных ПГ, необходимо поддерживать в них различные уровни воды. Поскольку на уровень воды в ПГ влияет расход подаваемой в него питательной воды (ПВ), проведена оценка ее скоростей на входе в ПГ. В пакете Ansys Fluent создана модель раздающего узла системы подачи ПВ в ПГ. На рис. 1 показана эпюра скоростей ПВ в системе, состоящей из двух трубопроводов, по которым ПВ при температуре 220 °С поступает в систему тройников, где два потока ПВ разделяются на четыре потока, которые далее подаются в четыре ПГ.

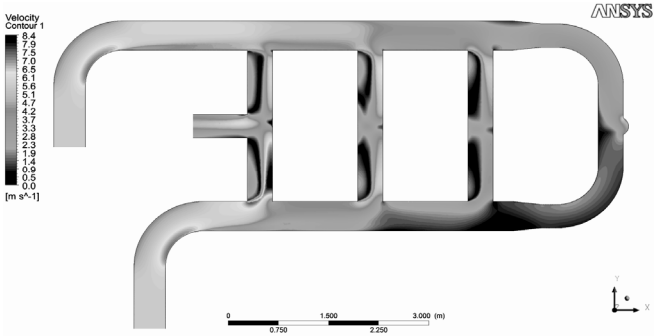


Рис. 1. Эпюра скоростей жидкости в раздающем узле системы подачи ПВ в ПГ

Разработанные методы и алгоритмы расчета предназначены для идентификации, прогнозирования и предотвращения возникновения акустических резонансов и уменьшения уровня вибраций в системах генерации и транспортировки пара АЭС с ВВЭР. В дальнейшем предполагается исследовать поля температур и плотностей в потоках ПВ.

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

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА РЕАКТОРА СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Среди наиболее перспективных ядерных энергетических установок можно выделить реакторы на быстрых нейтронах, предполагающие использование свинцового теплоносителя. В течение длительного времени свинец не рассматривался как возможный теплоноситель промышленных энергоустановок. Однако благодаря своим свойствам он оказался наиболее удобным для реализации принципа естественной безопасности.

Внедрение новых технологий требует проведения сложных комплексных исследований, в том числе моделирование аварийных ситуаций. В существующих проектах БРЕСТ-300 и БРЕСТ-1200 одним из важных вопросов, требующих углубленного анализа, является обоснование безопасности запроектной аварии с множественным разрывом теплообменных труб парогенератора. При разрыве трубок в тяжелой несжимаемой жидкости с температурой свинца выше критической температуры для воды возникает обратный паровой взрыв. Вода, диспергируя в свинце, быстро превращается в перегретый пар.

В работе анализируются теплофизические процессы при разрыве трубки парогенератора со свинцовым теплоносителем на различных стадиях истечения [1]: 1) формирование и распространение ударной волны в жидком свинце на начальной стадии истечения (временной масштаб порядка 0,0001 — 0,001 с); 2) ускорение массы жидкого свинца, вызванное его вытеснением расширяющимся паром (временной масштаб порядка 0,1 с); 3) формирование области многофазной смеси (капли воды, пузыри пара и несущая фаза жидкого свинца), в которой может реализоваться паровой взрыв (временной масштаб порядка 10 с). В дальнейшем для каждой стадии процесса будут разработаны соответствующие математические модели, позволяющие определять возникающие гидродинамические воздействия.

Литература

1. **Dinh T.N.** Multiphase Flow Phenomena of Steam Generator Tube Rupture in a Lead-Cooled Reactor System: A Scoping Analysis // Proceedings of ICAPP 2007, Nice, France, May 13—18, 2007. P. 7497.

П.С. Климов, асп.; рук. О.И. Мелихов, д. ф.-м. н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ КОРИУМА В НАТРИИ

Целью данной работы является анализ течения нескольких жидкостей со свободными границами на основе полунеявного метода движущихся частиц и применение этой программы для анализа гидродинамической фрагментации капли расплава в натрии.

В работе приведено описание полунеявного метода движущихся частиц [1]. Также рассмотрен ход протекания тяжелой аварии на АЭС с БН, показано существенное влияние взаимодействия кориума с натрием на развитие данного процесса. Выполнено численное моделирование фрагментации капли расплавленного кориума в натрии при ее импульсном ускорении, описаны основные закономерности этого процесса.

Одним из ключевых механизмов взрывного процесса взаимодействия кориума с натрием является фрагментация капель расплава под воздействием гидродинамических сил [2].

Выполнено численное моделирование фрагментации капли расплавленного кориума в натрии при ее импульсном ускорении. Сделаны три расчета с параметрами, соответствующими числам Вебера 12, 13 и 15. Определено критическое значение числа Вебера ($We_{кр} = 13$), начиная с которого возможна фрагментация капли.

Проанализирована феноменология протекания процесса. Показано, что эволюция капли происходит в две стадии. Во время первой стадии капля подвергается растяжению в поперечном направлении. На второй стадии капля фрагментирует, когда число Вебера становится больше критического ($We_{кр} = 13$). Картина после распада материнской капли зависит от числа Вебера. Количество образующихся фрагментов растет с увеличением числа Вебера.

Рост волн на поверхности капли вследствие развития неустойчивости является главным механизмом дробления капли на втором этапе, и именно оно определяет расположение капель после дробления [2].

Литература

1. **Koshizuka S., Oka Y.,** 1996. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. Nucl.Sci. Eng. 123, 421—434.

2. **Koshizuka S., Oka Y.**, 1995. Development of a particle method for calculating fragmentation of incompressible viscous fluid. Proc. US:Japan Joint Seminar: A Multidisci-plinary Int. Seminar on Intense Multiphase Interactions, Santa Barbara, CA. P. 145—158.

Н.Е. Мухамедов, докторант, Н.М. Бакаева, студ.; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц. (ГУ имени Шакарима, г. Семей, Казахстан)

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИИ С ПОВТОРНОЙ КРИТИЧНОСТЬЮ БЫСТРЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

В рамках работ в Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан проводятся эксперименты для исследований поведения топлива энергетического реактора в условиях моделирования аварии на реакторе ИГР.

В процессе развития аварийной ситуации в энергетическом реакторе с такой конструкцией ТВС выделяют четыре основных фазы:

1) начальная фаза характеризуется разрушением твэлов и плавлением топлива;

2) фаза раннего выведения топлива характеризуется выбросом части расплава топлива вверх через внутреннюю трубу;

3) фаза перемещения материалов характеризуется плавлением оставшегося в активной зоне топлива за счет остаточного тепловыделения и выводом расплава топлива в нижнюю часть корпуса реактора через направляющие трубы регулирующих стержней;

4) фаза охлаждения, в процессе которой осуществляется охлаждение расплава топлива, выведенного из активной зоны [1].

Результаты предварительных исследований показали, что в зависимости от величины теплового потока от расплава к стальной стенке направляющей трубы возможны два варианта развития событий:

– если тепловой поток равен 1 МВт/м^2, то к моменту разрушения стенки направляющей трубы регулирующего стержня фрагменты топлива будут расплавлены и переместятся в нижние области реактора вместе с расплавом стали;

– если тепловой поток равен 2 МВт/м^2, то к моменту разрушения стенки направляющей трубы регулирующего стержня фрагменты топлива не успевают расплавиться и после слива расплава стали могут остаться в объеме активной зоны [2].

Литература

1. **Принципиальная** программа испытаний. Экспериментальное изучение способов и путей выведения расплавленного топлива из активной зоны. Курчатов, 2010.

2. **Анализ** условий безопасного проведения испытаний экспериментального устройства ID3. ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК / рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников. Курчатов, 2011.

Л.И. Набиуллин, студ.; рук. М.А. Скачек, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАО АЭС

Проблема окончательной локализации радиоактивных отходов (РАО) выдвинулась на первый план нерешенных проблем развития современной ядерной энергетики. Десятки миллионов тонн кондиционированных и не кондиционированных радиоактивных отходов хранятся на промплощадках АЭС стран мирового сообщества, и ежегодно каждый из примерно 500 ядерных энергоблоков этих стран нарабатывает от 300 до 5000 т новых РАО, которые нуждаются в кондиционировании с последующей окончательной локализацией их долгоживущей, высокоактивной доли.

На сегодняшний день принято, что достаточная степень защиты населения и биосферы достигается путем долговременного контролируемого хранения РАО с последующей их окончательной локализацией (захоронением). В настоящее время существует ряд концепций окончательного удаления РАО из сферы жизнедеятельности человека. Превалирует концепция глубинного подземного захоронения, когда контейнер-упаковка с РАО должна быть помещена в захоронение-могильник, размещенный в стабильной геологической формации. Контейнеры-упаковки, инженерное оборудование могильника и геологическая среда обеспечивают барьеры, предотвращающие выход радионуклидов в окружающую среду [1].

В качестве геологических сред для сооружения могильника рассматривают пласты гранита и глины, базальт, туфы, купола каменной соли.

В данной работе использован аналитический подход к выбору участка сооружения шахты для окончательной локализации долгоживущих высокоактивных отходов в геологическом массиве, основанный на анализе исходной инженерно-геологической информации с учетом требований и уровней значимости, предъявляемых к сооружениям [2]. Приведена методика выбора участка с максимальным рейтингом для создания шахтного захоронения. Представлен проект шахты для окончательной локализации долгоживущих высокоактивных отходов в пласте каменной соли.

Литература

1. **Скачек М.А.** Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

2. **Морозов В.Н.** Радиоактивные отходы. Проблемы и решения. М.: Ядерное общество, 1992.

Нгуен Фам Хунг, студ.; рук. Ю.В. Парфенов, к.ф.-м.н., доц.;
(НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1500 С ПОМОЩЬЮ КОДА STEG

В настоящее время в России разрабатывается инновационный водо-водяной реактор нового поколения ВВЭР-1500. При разработке инновационной ЯЭУ с ВВЭР-1500 ставится цель, чтобы показатели уровня безопасности, эксплуатационной надежности и экономичности превосходили характеристики ВВЭР-1000 и обеспечивали конкурентоспособность проекта на мировом рынке.

На кафедре АЭС НИУ «МЭИ» на протяжении ряда лет разрабатывается трехмерный теплогидравлический код STEG, позволяющий моделировать пространственное течение двухфазной смеси во втором контуре горизонтального парогенератора. Код STEG прошел валидацию по результатам многочисленных экспериментов, выполненных на стендах ОАО «ЭНИЦ» и ОКБ «ГИДРОПРЕСС», в том числе на модели трубного пучка ПГ для АЭС с ВВЭР-1500. Для кода STEG была разработана подетализационная схема ПГВ-1500, выполнены расчеты распределения теплогидравлических параметров в стационарном режиме работы. На рис.1 представлено распределение скорости воды и истинного объемного паросодержания в одном из сечений ПГВ-1500.

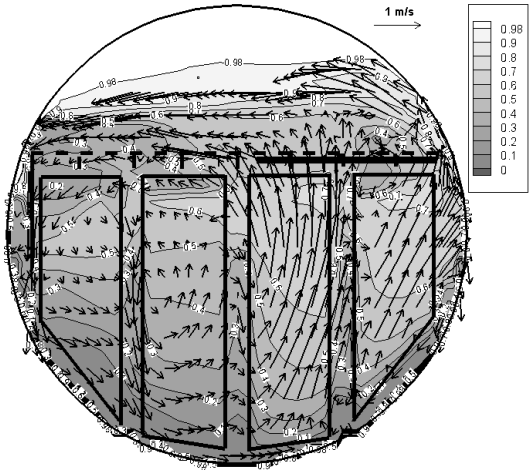


Рис. 1. Распределение скорости воды и паросодержания между коллекторами ПГ

Нгуен Тхи Нгует Ха, асп.; рук. В.П. Горбатых, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

Вопросы влияния внешней среды на прочность материалов относятся к наиболее важным и слабоизученным проблемам механики разрушений. В ней распределение упругих напряжений у вершины трещины описывается коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) [1].

КИН с учетом влияния коррозионной среды имеет вид

$$K_I = \sqrt{-\frac{C_{H_2}(t)4\pi DE\sigma_S}{\eta\eta_2 Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)}}, \qquad (1)$$

где $C_{H_2}(t)$ — концентрация водорода; D — коэффициент диффузии водорода в металлах; E — модуль Юнга; η — постоянная пары «металл-среда»; η_2 — некоторое число; $Ei\left(-r^2/4Dt\right)$ — интегральная показательная функция; σ_S — предел текучести на растяжение.

На рис. 1 показано, что накопление водорода в металле приводит к снижению предела прочности. Наработка, при которой происходит достижение пределом прочности величины приложенного напряжения, и составляет предельный срок службы.

Поэтому коррозионная среда имеет большое влияние на определение КИН, который является количественной характеристикой трещиностойкости материала.

Предполагается, что при оценке остаточного ресурса на стадиях образования и развития трещин нужно учитывать влияние коррозионной среды на усталостную меру повреждения, определить напряженно-деформируемое состояние в вершине трещины уже с учетом влияния на него внешней среды.

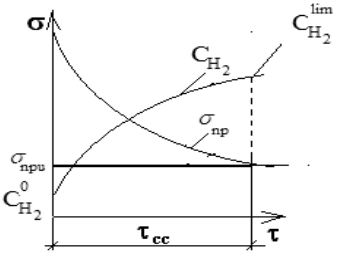


Рис. 1. Дислокационно-водородная модель коррозионного растрескивания под напряжением: $\sigma_{при}$ — приложенное напряжение; $\sigma_{пр}$ — предел прочности; τ — экспозиция; $\tau_{сс}$ — срок службы до отказа; $C^0_{H_2}$ — начальная концентрация водорода; $C^{lim}_{H_2}$ — предельная концентрация водорода перед возникновением трещины

Литература

1. **Черепанов Г.П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.

М.А. Пугачев, студ.; рук. Ю.Б Воробьев, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОДОВ С CFD

С ростом производительности компьютерной техники все большее распространение приобретают численные подходы, обеспечивающие высокую точность расчета реальных теплогидравлических процессов любой сложности. В свою очередь это позволяет оптимизировать имеющиеся конструкции и устройства, создавать новые, а также проводить методические исследования, не выполняя дорогостоящих натурных экспериментов. Численный расчет показывает, каким образом определенное изменение или добавление параметров исследуемой модели влияет на результат работы установки, а также дает ключевой толчок в понимании происходящих процессов и позволяет разработать новые идеи.

В настоящее время имеет место тенденция расширенного использования CFD моделирования теплогидравлических процессов на АЭС. Коды вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют обеспечить точное моделирование в двух- и трехмерных приближениях путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS). При этом моделируемые процессы часто не могут быть адекватно отображены с использованием традиционных одномерных системных кодов типа RELAP5. В то же время уточненное моделирование теплогидравлических процессов в проектных и запроектных авариях на АЭС является одной из самых важных задач в настоящее время при повышении во всем мире требований к их безопасности и эффективности. При использовании CFD кодов в этой области их главным недостатком является большое ресурсопотребление, что является основной причиной их локального применения для моделирования отдельных элементов с использованием одномерных системных кодов для подготовки граничных условий. В связи с этим представляется разумным рассмотреть ключевые моменты процесса стыковки кодов разного типа — CFD и системного типа RELAP5.

В докладе рассматриваются результаты работ по соединению CFD кода с исполняемой программой (ИП), которая впоследствии будет передавать необходимые параметры одномерному коду, например, RELAP5. В докладе представлены концепция, основные достоинства и возможности предлагаемого метода, результаты расчетов, демонстрирующие функциональные возможности разрабатываемой системы. Данный подход приводит к более рациональному использованию вычислительных ресурсов, а также позволяет напрямую контролировать вычислительный процесс.

А.В. Тулинов, студ.; рук. Б.А. Ионов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УСТРОЙСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ЛОВУШЕК И ИХ АНАЛИЗ

Для водо-водяных энергетических реакторов, составляющих основу мировой атомной энергетики, наибольшую опасность представляют аварии с разрушением системы охлаждения активной зоны, сопровождаемые возникающим при этом плавлением ядерного топлива и образованием больших количеств водорода при взаимодействии паров воды с расплавляющимися циркониевыми оболочками топливных стержней. Именно на предотвращение их возникновения и локализацию последствий нацелены новые технические решения для повышения безопасности АЭС следующего поколения.

В России уже ведется строительство ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006), призванных стать основой крупномасштабного наращивания атомных мощностей в текущем столетии, а значит, требования они должны выдерживать самые жесткие. В частности, в проекте предусматривается наличие ловушки.

Однако на пути разработчиков ловушек кориума немало проблем [1]:

- перемещения кориума в зоне локализации;
- обеспечение стойкости УЛР к падению крупногабаритных фрагментов [2];
- определение воздействия струи расплава и других динамических и тепловых воздействий на элементы УЛР;
- выход продуктов деления и неконденсирующихся газов, включая водород.

Процесс протекания тяжелой аварии долгое время изучался при помощи различных теплофизических и прочностных кодов. В результате специалистами для решения этих проблем были разработаны различные виды ловушек в конструктивном и технологическом плане [3].

В докладе подробно рассматриваются существующие или предлагаемые конструкции ловушек расплава, проблемы, связанные с реализацией той или иной концепции, а также их преимущества и недостатки.

Литература

1. **Столяревский А.Я.** Атомные станции: теперь с «ловушкой» или как предотвратить «китайский синдром?» // Энергия. 2002.

2. **Устройство** локализации расплава. Пояснительная записка к проекту НВАЭС-2.

3. **Доронин А.**Обзор инженерных средств локализации расплава ядерного топлива при авариях с плавлением активной зоны реактора // ВИНИТИ. 1996. № 6. б/о 225.

К.Н. Чыонг Ван, асп.; рук. Ю.Б. Воробьев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА АВАРИИ НА АЭС НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЕЕ РАЗВИТИЯ

При нормальной работе АЭС, а также в случае аварии происходит взаимодействие различных ее компонентов и физических процессов, что определяет весьма сложное поведение как отдельных элементов станции, так и всей системы в целом. К оператору АЭС поступает большой объем информации, который характеризуется многомерностью, взаимовлиянием между параметрами, наложением стохастических погрешностей. Все это затрудняет правильную идентификацию состояний системы, прогнозирование ее развития и планирование эффективных противоаварийных мероприятий. Имеющиеся в настоящее время системы поддержки оператора на АЭС часто базируются только на определении предаварийной ситуации и факте возникновения аварии. Однако для принятия действенных противоаварийных мероприятий необходима система, позволяющая не только сигнализировать о возникновении аварии, но также определять тип аварийной ситуации и осуществлять поддержку оператора или кризисного центра непосредственно в процессе протекания аварии путем прогнозирования ее последствий. В дополнение нужно учесть погрешность (неопределенность) моделирования современными расчетными кодами типа Relap5, что затрудняет прогнозирование и, следовательно, корректную идентификацию стадий аварий.

Для решения перечисленных проблем в докладе предлагается совместное применение двух направлений вычислительных технологий для определения типа аварий на АЭС на разных этапах ее развития. Это методы анализа динамических процессов на АЭС на основе интегральных кодов улучшенной оценки и обработка сложной информации с использованием нейронных сетей. В докладе представлены результаты расчетов по определению аварии для модели реакторной установки ВВЭР-1000/В320 на основе нейронной сети. В качестве интегрального кода по моделированию динамических процессов на АЭС используются Relap5 mod.3.3. Для корректного учета возможного отклонения реальных динамических процессов на АЭС от их моделирования на основе детерминистических кодов применяется анализ неопределенностей. Для увеличения его эффективности подходе используются методы латинских гиперкубов и параллельных вычислений, реализованные в программной системе NPO.

В.М. Яськив, асп.; рук. В.П. Горбатых, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ СРЕДЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

Металлы конструкционных материалов парогенератора (ПГ) работают в сложных эксплуатационных условиях: наличие высоких растягивающих напряжений и их колебания, высоких температур тепловых нагрузок со значительной частотой теплосмен, действие на металл коррозионной среды и накипеобразования [1].

Вычисленное значение наибольшего коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I (как определенной функции нагрузок, размеров тела и длины начальной трещины) приравнивается некоторому критическому значению этого коэффициента, характеризующему сопротивление материала отрыву на фронте трещины нормального разрыва.

Таким образом, одной из основных задач, стоящих перед механикой разрушения в связи с расчетом на прочность, состоит в определении КИН, непосредственное влияние на который оказывает коррозионная среда.

В рамках данной статьи было выведено определение КИН с учетом влияния водорода:

$$K_I = \sqrt{-\frac{C(t)4\pi DE\sigma_s}{\eta\eta_2 Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)}},$$

где σ_s — предел текучести на растяжение, кг/мм^2; E — модуль Юнга, Н/мм^2; K_I — КИН, Н/мм$^{3/2}$; η, η_2 — коэффициенты; D — коэффициент диффузии водорода в металлах; $C(t)$ — концентрация водорода, мг/кг; $Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)$ — интегральная показательная функция [2].

Проводить анализ прочности и долговечности конструкций, эксплуатирующихся в сложных условиях, без учета влияния коррозионной среды, но лишь с учетом введения поправочных коэффициентов, зачастую неоправданно.

Таким образом, влияя на параметры коррозионной среды (в частности, на водородный показатель), можно влиять на срок безаварийной службы оборудования АЭС.

Литература

1. **Акользин П.А., Герасимов В.В., Горбатых В.П.** Локальная коррозия металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1973. — 272 с.

2. **Черепанов Г.П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. — 640 с.

Секция 40

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Председатели секции — зав. каф. ОФиЯС, д.т.н., профессор А.Т. Комов; д.ф.-м.н., профессор А.М. Борисов (МАТИ)
Секретарь секции — д.т.н., профессор А.В. Лубенченко

Б.Ю. Агишев, асп.; рук-ли А.Т. Комов, д.т.н., проф., А.Н. Варава, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ

Требования к энергогенерирующим предприятиям, включая атомные электрические станции, с каждым годом становятся все более жесткими как с точки зрения безопасности, так и производительности. В частности, развитие ядерной энергетики выдвинуло в ряд наиболее важных технических проблем обеспечение надежного теплосъема в каналах активных зон ядерных реакторов. В целях повышения энергонапряженности РУ и понижения температуры топлива необходимо проведение комплекса работ по разработке новых конструкций твэлов с альтернативными схемами съема тепла. Одной из таких разработок являются тепловыделяющие сборки с трубчатыми твэлами [1—3].

Для внедрения той или иной технологии в ядерную энергетику необходимо провести комплекс научно-исследовательских и конструкторских работ, направленных на научно-техническое обоснование и возможность использования ТВС ядерных реакторов нового поколения. Для проведения подобных исследований в НИУ «МЭИ» создан экспериментальный стенд «Тепловыделяющая сборка». Стенд позволяет проводить работы по исследованию теплогидравлических характеристик различных объектов в широком диапазоне режимных параметров: давлении до 16 МПа и температуре до 360 ^{o}C.

Работа посвящена исследованию теплообмена на выпуклой поверхности модельных элементов трубчатого твэла. В первом приближении выпуклую поверхность трубчатого твэла можно моделировать выпуклой обогреваемой поверхностью цилиндрического рабочего участка, а межтвэльное пространство — кольцевым зазором между рабочим участком и сосудом высокого давления.

Литература

1. **Патент России** 2220464 МКИ3G 21C3/00, 3/30, 3/32. Тепловыделяющая сборка : Заявка №2002104121 от 20.02.2002 / В.Н. Блинков, Э.А. Болтенко // Открытия. Изобретения. 2003. № 36.

2. **Болтенко Э.А.** Кризис теплообмена в кольцевых каналах с закруткой потока // Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 25—30.

3. **J. Zhao, H.C. No, M.S. Kazimi.** Mechanical Analysis of High Power Internally Cooled Annular Fuel // Journal of Nuclear Technology. 2004. Vol. 146.

Н.М. Бакаева, студ., Н.Е. Мухамедов, докторант; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей, Казахстан)

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ

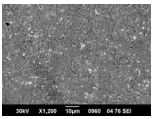
Одним из перспективных источников энергии, который по прогнозам удовлетворит все потребности, является энергия термоядерного синтеза. Благодаря хорошим ядерно-физическим свойствам бериллий привлекает все большее внимание исследователей и конструкторов при разработке и создании различных конструкционных элементов атомной техники (см. табл. 1).

Таблица 1

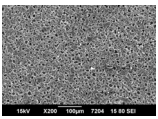
Химический состав бериллия марки ДВ-56

Элемент	Be	Si	Fe	Al	C	BeO
Содержание, %	98,640	0,013	0,055	0,020	0,072	1,200

По методу гидростатического взвешивания проводились измерения плотности облученного бериллия. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, плотность которой составляет d = 0,998, при температуре 23 °С. Используя расчетную формулу, высчитана плотность, которая составила 1,85 ± 0,02 г/см^3. В результате измерений микротвердость облученного бериллия по известным формулам составила 177±9 кгс/мм^2.



До отжига



После отжига

Рис. 1

Выводы:

– в результате отжига до температур плавления образцы уменьшились в весе. Образование в определенных условиях газовой пористости привело к распуханию материала, во всем объеме всех образцов преобладает пористая структура с наличием микротрещин (рис.1);

– анализ электронно-микроскопических изображений внутренней и внешней поверхностей образцов показывают, что внутренняя сторона отличается более плотной структурой пор;

– исследование поверхности поперечного сечения образцов показало наличие пор с большой плотностью, большинство из которых расположены в линию.

Литература

1. **Вашуль Х.** Практическая металлография. Методы изготовления образцов. М.: Металлургия, 1988.

2. **Шиммель Г.** Методика электронной микроскопии. М., 1972.

А.В. Беляев, асп.; рук. А.В. Дедов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В КАНАЛАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПРИ ВЫСОКИХ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в вынужденном потоке кипящей жидкости в канале малого диаметра при высоких приведенных давлениях. Актуальность данных исследований связана с растущим интересом к миниатюрным теплообменным устройствам в различных отраслях промышленности.

В миниканалах ($0{,}2 < d \leq 3$ мм) могут появляться особенности, связанные с характерными масштабами процессов, протекающих в жидкости при кипении, и линейными масштабами канала. Режимы течения двухфазного потока становятся превалирующими для понимания механизмов процесса, могут появляться режимы с ухудшенной теплоотдачей. Расчет теплоотдачи в таких условиях по известным соотношениям для обычных труб плохо сходится с экспериментом. Возникает необходимость в новых методах расчета коэффициента теплоотдачи. В литературе описано множество экспериментальных работ. Однако в большинстве из них данные получены в области низких и умеренных приведенных давлений. Кроме того, предложенные авторами расчетные методики носят эмпирический характер и описывают лишь данные авторов, поэтому они не универсальны.

Целью работы является экспериментальное подтверждение предположения того, что в области высоких приведенных давлений режимы течения в миниканалах становятся идентичными тем, что наблюдаются в обычных каналах. В этом случае для расчета теплоотдачи в миниканалах можно использовать расчетные соотношения, используемые для обычных каналов. Представлено описание экспериментального стенда, а также опытные данные о теплоотдаче. На стенде выполняются экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при вынужденном течении фреона R113 и RC318 в вертикальном канале диаметром 1,36 мм, длиною 200 мм. Выполнены серии экспериментов, включающие в себя 44 режима. Отношение давления на входе рабочего участка к критическому давлению составляло $p/p_{кр} \cong 0{,}5 \div 0{,}7$. Измерения проводились в интервале массовых скоростей от 1000 до 4600 кг/(м^2·с), и температурах входа от 50 до 180 ºС. На каждом режиме с фиксированными параметрами подводилась максимально возможная мощность, значение которой определялось или возможностью источника питания, или наступлением кризиса теплообмена при кипении, или когда температура стенки превышала 350 ºС.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

К настоящему времени реакторные установки с традиционными тепловыделяющими сборками с точки зрения энергонапряженности, вышли в своем развитии на плато. Дальнейшее развитие реакторных установок по энергонапряженности и при обеспечении их безопасности, связано с разработками и созданием реакторных установок нового поколения. К таким перспективным установкам можно отнести реакторные установки с микротвэльной шаровой засыпкой. Увеличение поверхности теплообмена, однородность температурного поля по сечению потока, исключение возможности тяжелой аварии, существенное улучшение выгорания топлива — это лишь немногие преимущества применения микротвэльной засыпки в реакторных установках [1—3]. Достоинства их применения достаточно подробно описаны во многих теоретических трудах, известны работы по технологии создания и испытаниям микротвэлов, проведен ряд работ по гидродинамике и теплообмену в шаровой засыпке, однако эти работы проводились в узких интервалах параметров состояния [4].

В данной работе для моделирования микротвэлов была сконструирована установка, в которой тепловыделяющими элементами являются металлические шарики, внутреннее тепловыделение в которых обеспечивается высокочастотным нагревом. Данный способ нагрева был выбран как наиболее приближенный к реальным условиям без нарушения гидродинамики засыпки, но были рассмотрены и другие варианты. На данной установке проведены систематизированные исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в широком диапазоне параметров состояния и различных параметрах потока.

Литература

1. **Концепция** безопасного корпусного водо-водяного реактора с тепловыделяющими блоками на основе микротвэлов ВТГР / А.О. Гольцев и др. // Атомная энергия. 1993. Т.75. № 6.

2. **Перспективы** создания прямоточных микротвэльных ядерных реакторов с перегревом пара / Г.А. Филиппов и др. // Тяжелое машиностроение. 2002. № 1.

3. **Перспективы** применения микротвэлов в ВВЭР / Н.Н. Пономарев-Степной и др. // Атомная энергия. 1999. Т. 86. № 6.

4. **Богоявленский Р.Г.** Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

Е.Ю. Брагин, асп.; рук. В.М. Кулыгин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ НА УСТАНОВКЕ «ПС-1»

Установка ПС-1 состоит из четырех вакуумных объемов: газовой камеры, источника холодной плазмы, камеры нагрева ионов и приемного объема. Источник плазмы представляет собой пробочную магнитную ловушку с диверторной конфигурацией магнитного поля. В газовую камеру напускается рабочий газ, который затем поступает через пробку в источник. Здесь по волноводу в камеру вводится СВЧ-мощность, в результате чего газ ионизуется при выполнении условия ЭЦР. Из источника плазма может вытекать в трех направлениях: в диверторные щели, а также через обе пробки — в газовую камеру и камеру нагрева ионов. Камера нагрева ионов представляет собой соленоид, который, по сути, является длинной пробкой ловушки, внутри которой расположена винтовая антенна. С помощью этой антенны в плазму вводится ВЧ-мощность, которая вкладывается в энергию поперечного движения ионов. Из камеры нагрева плазма попадает в приемный объем, где осуществляется откачка газа.

В приемном объеме реализуется конфигурация магнитного поля, которая получила название «магнитное сопло». В плазменном ракетном двигателе магнитное сопло играет важную роль, так как в нем энергия поперечного движения ионов преобразуется в энергию их продольного движения и формируется плазменный поток с малыми углами расхождения. Таким образом, изучение процессов, протекающих в магнитном сопле с целью оптимизации его параметров должно привести к улучшению таких основных характеристик двигателя, как тяга, удельный импульс и КПД.

Магнитные ловушки с диверторной конфигурацией магнитного поля уже давно используются в различных областях техники и технологии, так как данная конфигурация позволяет получить практически плоский радиальный профиль плазменного потока, вытекающего из ловушки, что принципиального важно для его эффективного нагрева.

В данной работе были экспериментально исследованы все три плазменных потока на установке ПС-1. С помощью линеек зондов Ленгмюра были получены распределения параметров плазмы потоков, а также с помощью сеточного анализатора были получены функции распределения ионов по энергиям при разных режимах работы.

А.С. Грязев, асп.; рук. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНОГО СОСТАВА ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В наши дни во многих областях науки и техники требуется определить структуру и провести послойный анализ поверхности твердого тела. Для анализа поверхности сейчас активно развивается такой метод исследования, как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Данному методу неразрушающего анализа посвящено огромное количество работ по всему миру [1]. Задача восстановления послойного профиля материала по рентгеновскому фотоэлектронному спектру относится к категории обратных задач математической физики. В большинстве работ эта задача решается путем анализа только упругого пика (так называемый peak-shape analysis [2]), при котором из всего анализируемого спектра выделяют только пики от электронов, не испытавших ни одного неупругого соударения, причем отдельной нетривиальной задачей является способ вычитания фона под анализируемыми пиками.

В данной работе анализ происходит не только по упругому пику, но и по фону от него, т.е. учитываются и электроны, попавшие в неупругий канал. В расчете применяется многослойная модель, а результатом расчета рентгеновского фотоэлектронного спектра являются толщины слоев.

Для корректного восстановления послойного профиля, учитывая многократные упругие и неупругие потери электронов в веществе, следует достаточно хорошо знать кроме дифференциальных сечений упругого взаимодействия также дифференциальные сечения неупругого взаимодействия электронов в различных слоях. Сечения неупругого взаимодействия можно получить путем прямого расчета спектра характеристических потерь энергии электронов (ХПЭ), используя процедуру фитинга.

Таким образом, объединение двух подтипов электронной спектроскопии — РФЭС и ХПЭ — улучшает как количественный, так и качественный результаты анализа поверхности.

Литература

1. **Powel C.J., Jablonski A.** Progress in quantitative surface analysis by X-ray photoelectron spectroscopy: Current status and perspectives. // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2010. Vol. 178—179. P. 331—346.

2. **Lopez-Santos M.C., Yubero F., Espinos J.P., Gonzalez-Elipe A.R.** Nondestructive depth compositional profiles by XPS peak-shape // Anal. Bioanal. Chem. 2010.Vol. 396. P. 2757—2768.

Г.Е. Ермаков, студ.; рук. В.М. Кулыгин, к.ф.-м.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ

При плазменной сепарации материалов возникает задача диагностики плазменных потоков сложного массового, энергетического и зарядового состав. Эта задача не может быть решена в рамках одного диагностического устройства, и поэтому требуется создать специализированную диагностическую систему.

Первый этап работ по плазменной сепарации предусматривает получение потока металлической плазмы при катодном распылении образцов. Максимальная плотность плазмы потока ~1012 $см^{-3}$, температура электронов ~ (10—20) эВ. Для того этапа работ выбрана диагностическая система в составе:

- магнитного масс-спектрометра с доускорением ионов до энергий ~ 1 кэВ;

-цилиндрического электростатического анализатора для регистрации ионов с энергиями более 100 эВ. При доускорении ионов малых ((0—50) эВ) энергий проводится анализ ионов по зарядовым состояниям;

- фильтра Вина для анализа потоков по зарядовым состояниям;

- монохроматора для контроля поведения линий элементов и их ионов в источнике металлической плазмы.

Приводятся обоснование выбранной системы, ее анализ и расчет отдельных элементов.

В.Д. Жакетов, студ.; рук. Д.А. Щеглов, д.ф.-м.н. (НИУ «МЭИ»)

АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Диагностическая система ЛИФ в диверторе ИТЭР требует абсолютной калибровки перед возможностью использования. Отработка технологии калибровки в данной работе осуществляется на экспериментальной установке «Гелла», являющейся экспериментальным стендом для отработки системы ЛИФ в рамках программы ИТЭР. Требования к калибровке заключаются в том, чтобы методика была наиболее проста технически и экономически выгодна. Для этого была выбрана методика абсолютной калибровки с помощью рэлеевского рассеяния. Метод заключается в рассеянии зондирующего излучения на молекулах или атомах газа, предварительно накаченного в систему.

Суть калибровки заключается в том, чтобы, зная параметры напущенного газа, установить связь этих параметров с показаниями диагностической аппаратуры, что потом позволит осуществлять эксперименты уже с ЛИФ, имея отстроенную систему, и исходя из диагностических показаний приборов судить о параметрах исследуемого разряда.

Таким образом, в данной работе сначала были определены сечения рэлеевского рассеяния [1, 2] различных газов с соответствующими поправками на поляризованность зондирующего луча и осуществлен последующий выбор рабочих газов. Исходя из расчетов и экономической доступности газов было решено использовать в эксперименте углекислый газ, азот и аргон, т.е. из всех экономически доступных газов они обладали наибольшим сечением рэлеевского рассеяния. Далее были проведены эксперименты на установке «Гелла» по абсолютной калибровке системы ЛИФ. Оказалось, что для схемы «Геллы» нет необходимости в больших энергиях зондирующего лазерного излучения. Были определены показания диагностической аппаратуры для соответсвующей энергии и длины волны лазерного импульса при использовании конкретного газа с заданными условиями.

Литература

1. **Аллен К.У.** Астрофизические величины. М.: Издательство «МИР», 1977.

2. **Фабелинский И.Л.** Молекулярное рассеяние света. М.: Наука, 1965. — С. 454.

В.Д. Жакетов, студ.; рук. Д.А. Щеглов, д.ф.-м.н. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ И ОТРАБОТКА АЛГОРИТМА НА МАКЕТЕ СИСТЕМЫ ЛИФ ДЛЯ ИТЭР

После сборки макетного образца системы регистрации ЛИФ с узлом разделения светового сигнала и проведения предварительного тестирования, подтверждающего работоспособность системы, были проведены испытания для проверки основных характеристик и параметров макета.

Требовалась доработка макетного образца системы регистрации светового сигнала ЛИФ по результатам испытаний, но основная часть работы заключалась в разработке алгоритма предварительной обработки сигнала ЛИФ и его реализации в виде модуля в уже существующей программе для получения сигнала с АЦП. Алгоритм предварительной обработки сигнала необходим для возможности дальнейшего определения по профилю сигнала различных характеристик исследуемого объекта [1]. При этом важным было соблюдение основных требований установленными ИТЭР. Это, в первую очередь, качество алгоритма, позволяющего получать после обработки сигнала плотности и температуры ионов с погрешностью не большей, чем 3 %, но и в то же время скорость и быстрота алгоритма. Предполагаемая частота лазера ЛИФ на ИТЭР — 100 Гц. Это означает, что обработка одного импульса должна быть совершена менее чем за 10 мс.

Таким образом, в ходе работы выполнена доработка макетного образца системы регистрации светового сигнала ЛИФ по результатам испытаний. В процессе доработки была выполнена регулировка положения кристаллов удвоения и утроения настольного блока ОРО для увеличения мощности лазерного излучения. Также проведена регулировка пространственного расположения световодов.

Далее был разработан алгоритм предварительной обработки сигнала ЛИФ. Алгоритм реализован в программной среде MatLab, ведется реализация в среде программы на языке C++ для возможности обработки данных в реальном времени. Алгоритм отработан на экспериментальном стенде на примере гелиевой лампы.

Литература

1. **Москаленко И.В., Шуваев Д.А., Щеглов Д.А.** Измерения локальной электронной плотности при помощи лазерной флуоресценции // Тезисы X Российской конференции по диагностике высокотемпературной плазмы, 8—13 июля 2003. Троицк. С. 51.

А.В. Исаев, студ. (НИУ «МЭИ») ; рук. И.В. Москаленко, д.ф.-м.н., в.н.с. (НИЦ «КИ»)

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ BE-III В УСЛОВИЯХ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ ITER

В работе описывается разработка спектроскопической модели для детектирования концентрации ионов Be-III в диверторной плазме ITER на основе явления лазерно-индуцированной флуоресценции. Кратко описываются модели [1—4], в соответствии с которыми проводится такой расчет. Обосновываются преимущества ЛИФ-диагностики для подобных задач.

Бериллий — один из наиболее важных компонентов плазмы для диагностики в ITER, поскольку с его помощью значительная мощность может уноситься из реактора путем излучения.

Для плотности и температуры диверторной плазмы ITER представлена оценка интенсивности сигнала флуоресценции с учетом результатов расчета по разработанной модели, а также с учетом геометрии и пропускной способности тракта ЛИФ-диагностики на наблюдаемой длине волны. Сделан вывод о применимости ЛИФ-диагностики для данной задачи.

Литература

1. **Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А.** Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973.

2. **Tawara H., Kati T., Ohnishi M.** Ionization cross section of at-oms and ions by electron impact. IPPJ-AM-37, Nagoya University, 1985.

3. **H. Van Regemorter** // Astrophis. J. 136, 906 (1962).

4. **A.J.H. Donné, A.E. Costley, R. Barnsley et al.** // Nucl. Fusion 47 (2007) Chapter 7: Diagnostics. P. S337—S384.

5. **J.N. Brooks, J.P. Allain, T.D. Rognalien.** Erosion/deposition analysis of the ITER first wall convective and non-convective plasma transport // Phis. Plasmas 13 (2006). 122502. 8 pp.

А.С. Каплевский, А.В. Грунин, В.Н. Ермаков, аспиранты,
Я.А. Садовский, к.ф.-м.н., асс., С.В. Вергазов, н.с.,
П.А. Шигин, к.ф.-м.н., доц.; рук. Л.Б. Бегрambеков, д.ф.-м.н., проф.,
(НИЯУ «МИФИ»)

ГАЗООБМЕН МЕЖДУ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ С ПРИМЕСЬЮ КИСЛОРОДА И СТЕНКОЙ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Работа посвящена изучению особенностей газообмена между плазмой инициированного дейтериевого разряда и стенками вакуумной камеры из нержавеющей стали. Поверхность стенки облучалась атомами дейтерия, которые генерировались при диссоциации молекул дейтерия на накаленном вольфрамовом катоде в рабочем газе, составов D_2+xO_2, где $x = 0{,}5 \div 30$ %, при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Торр. Состав газов в вакуумной камере контролировался масс-спектрометром. Облучение стенки проводилось также ионами и атомами плазмы, создаваемой в рабочем газе тех же составов ($E_i \approx 10$ эВ). Длительность облучений одинаковая. Для измерения количества дейтерия, захваченного в стенку, после окончания облучения поверхность стенки облучалась атомами водорода в рабочем газе, составов H_2+xO_2, где $x = 0{,}5 \div 30$ %, при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Торр, и измерялась десорбция дейтерия. Температура стенки не превышала 40 °С.

Эксперименты показали, что облучение в указанных выше условиях активирует диффузию водорода из вакуумной стенки, выполненной из нержавеющей стали, формирование на поверхности и десорбцию молекул H_2O, HDO, D_2O, HD и H_2. Практически весь кислород во всем исследованном диапазоне его концентраций в рабочем газе участвует в образовании молекул (H_2O, HDO, D_2O). Выход водорода из объема стали растет с увеличением концентрации кислорода в рабочем газе (табл. 1).

Таблица 1

Десорбция H_2 из стенки и захват D_2 в стенку при облучении

Кислород в рабочем газе, %	Десорбция водорода из стенки за 40 мин, (N_H), ат/см^2	Захват дейтерия в стенку дейтерия за 40 мин, (N_D) ат/см^2	N_H/N_D
0,5	$1{,}0 \cdot 10^{17}$	$0{,}3 \cdot 10^{17}$	3,3
2	$1{,}0 \cdot 10^{17}$	$0{,}5 \cdot 10^{17}$	2,0
10	$1{,}7 \cdot 10^{17}$	$0{,}9 \cdot 10^{17}$	1,9
20	$2{,}0 \cdot 10^{17}$	$1{,}1 \cdot 10^{17}$	1,8
30	$2{,}9 \cdot 10^{17}$	$1{,}5 \cdot 10^{17}$	1,9

Облучение стенки атомами водорода в газе H_2+xO_2 после облучения атомами или ионами дейтерия приводит к удалению внедренных частиц дейтерия. В сталь захватывается меньше дейтерия, чем было удалено водорода. Десорбция водорода и захват дейтерия слабо зависели от условий облучения стенки при одинаковых составах рабочего газа.

И.И. Коротких, асп.; рук. К.Ш. Нгуен, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ КОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕЗ ТЕРМИЧЕСКИ ВОЗБУЖДЕННЫЕ СРЕДЫ

Данное исследование посвящено разработке теоретических основ и проведению экспериментов по прохождению коротких световых импульсов малой интенсивности с линейным фронтом через термически возбужденные среды (газ, плазму). В условиях реального физического эксперимента измерялась скорость прохождения фронта коротких световых импульсов наносекундной длительности через исследуемые среды в диапазоне температур $T = (300—500)$ К.

Экспериментально установлено, что в термически возбужденной двухуровневой среде скорость прохождения коротких световых импульсов наносекундной длительности больше, чем в вакууме [1—3].

Методика измерений апробирована при проведении тестовых измерений с водой, где удалось получить значение коэффициента преломления воды, совпадающее с табличным. Разработанная методика исследования позволяет проводить измерения скорости в широком диапазоне температур и давлений, а также построить теоретическую модель взаимодействия фотонов с термически возбужденными средами в рамках квантово-механической теории. Данную методику также можно использовать для бесконтактной диагностики термически возбужденных сред, т.е. определения концентрации частиц, их массы, температуры, а также частот, соответствующих резонансным переходам в молекулах.

Литература

1. **Векленко Б.А., Малахов Ю.И., Нгуен К.Ш.** Сверхсветовые сигналы в квантовой оптике // Инженерная физика. 2013. № 5.

2. **Регистрация** зависимости скорости электромагнитного фронта от температуры с теоретическим обоснованием и демонстрационными примерами / Ю.И. Малахов, М.Я. Иванов, Ши Нгуен Куок, В.В. Щаулов // Тр. 11-й Межд. конф. «Забабахинские научные чтения». Снежинск: РФЯЦ — ВНИИТФ, 2012.

3. **Векленко Б.А.** Нестационарное рассеяние квантованного электромагнитного поля на возбужденном атоме // Прикладная физика. 2010. № 3.

А.С. Мартыненко, Т.С. Климюк, Е.Д. Филиппов, студенты,
И.Ф. Раевский, С.А. Саранцев, аспиранты;
рук. А.С. Савелов, д.ф.-м.н., проф. (НИЯУ «МИФИ»)

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Установки с источником плазмы типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НВИ) являются перспективными для решения широкого круга задач. Такие особенности этих установок, как высокие параметры плазмы, простота конструкции и относительно невысокая стоимость, делают их перспективными для технологических применений. Кроме этого, исследование параметров плазмы, излучательных характеристик и ускорительных механизмов в микропинче — плазменном объекте с высокими значениями плотности и температуры, достигаемыми при запасаемой энергии не больше нескольких кДж, представляет интерес и для более масштабных установок ввиду универсальности характера ряда физических явлений протекающих в Z-пинчах.

При исследовании процессов, протекающих в межэлектродном промежутке НВИ, весьма информативными являются лазерные методы диагностики с визуализацией поля излучения. Широкое распространение получили методы теневого фотографирования, в частности, шлирен-методы и интерферометрия.

В силу того, что плазма НВИ обладает высокими параметрами (плотность в периферийной области разряда $\geq 10^{17}$ см$^{-3}$, плотность в пинче $\sim 10^{21}$ см$^{-3}$, температура ≥ 1 кэВ), необходимо использовать коротковолновые лазеры.

В работе приводятся результаты исследования динамики плазмы НВИ на установке «Пион» с помощью лазерных методов с визуализацией поля излучения. В качестве осветителя использовался лазер на молекулярном азоте ЛГИ-21 с длиной волны $\lambda = 337$ нм. Установлены закономерности развития разряда при различной геометрии системы электродов, установлены условия наиболее стабильного протекания разряда, установлено влияние системы инициирования разряда на динамику НВИ.

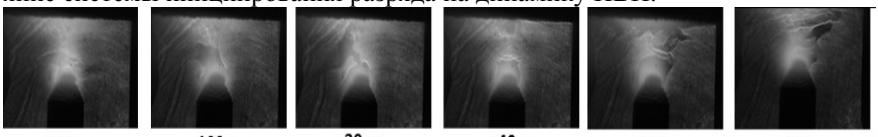


Рис. 1. Последовательность теневых фотографий развития НВИ на установке «Пион»

А.С. Попков, студ., С.А. Крат, асп.; рук-ли Ю.М. Гаспарян, к.ф.-м.н., доц., А.А. Писарев, д.ф.-м.н., проф. (НИЯУ «МИФИ»)

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ ПРИ СООСАЖДЕНИИ С ЛИТИЕМ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

Накопление изотопов водорода в термоядерных установках — важный вопрос с точки зрения радиационной безопасности. Одним из каналов накопления водорода является его соосаждение с материалами обращенных к плазме элементов. Один из наиболее перспективных материалов, рассматриваемых для защиты первой стенки реактора — это литий [1]. Химическая активность лития делает необходимой *in situ* исследования соосажденных Li-D слоев. В этой работе представлена установка для соосаждения Li-D смешанных слоев и их in situ анализа методов термодесорбционного анализа (ТДС).

Для получения соосажденных слоев используется магнетронная распылительная система постоянного тока, позволяющая производить распыление лития из жидкой фазы. Чистота рабочего газа во время осаждения контролируется при помощи калиброванной течи между камерами напыления и ТДС. Специальная конструкция держателя образцов позволяет полностью восстанавливать вакуумную изоляцию после переноса экспериментального образца из одной камеры в другую. Температура образца контролируется во время осаждения и может быть искусственно увеличена. Для защиты самого держателя образцов от запыления и получения более качественной картины ТДС используется система диафрагм. Раздельная откачка камер напыления и ТДС позволяет экспонировать Li-D пленку на атмосферный воздух без прекращения откачки камеры ТДС.

Интегральное содержание дейтерия в полученных пленках было не менее 5 ат.%. Термодесорбционный спектр дейтерия для полученных пленок имеет два ярко выраженных пика при температурах 670 и 820 К. При этом первый пик всегда доминирует. После трехдневного контакта с атмосферным воздухом содержание дейтерия в пленках опускалось ниже порога детектирования.

Литература

1. **Mirnov S.** Plasma-wall interactions and plasma behaviour in fusion devices with liquid lithium plasma facing components. Journal of Nuclear Materials, 2009.

Ю.В. Сморчкова, асп.; рук. А.В. Дедов, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ С МИКРОТВЭЛАМИ

Для повышения безопасности АЭС в НИЦ «Курчатовский институт» и ВНИИАМ была предложена концепция реактора типа ВВЭР с топливом на основе микротвэлов [1]. Согласно этой концепции засыпка из микротвэлов размещается в кассетах с продольно-поперечным движением теплоносителя. При этом микротвэлы непосредственно охлаждаются как однофазным, так и двухфазным теплоносителем. ТВС, собранные из таких кассет, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными стержневыми.

Одна из основных трудностей, возникающая при внедрении микротвэлов в водоохлаждаемые реакторы, состоит в недостаточной изученности физики таких активных зон. В частности, это касается гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках. Несмотря на наличие достаточно большого количества работ по исследованию гидродинамики и теплообмена при течении однофазных и двухфазных потоков в шаровой засыпке, экспериментального и теоретического материала явно недостаточно для того, чтобы приступить к проектированию ТВС с шаровыми засыпками.

В работе представлены результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена в тепловыделяющей сборке с микротвэлами (ТВС МТ). Моделирование проводилось в пакете прикладных программ Anes. Для описания гидродинамики и теплообмена в тепловыделяющей сборке с микротвэлами использовался подход, основанный на модели пористой среды с внутренними источниками тепла.

В результате моделирования определены параметры перфорации чехлов, при которых достигается наибольшая равномерность подогрева теплоносителя по высоте ТВС МТ и обеспечивается радиальное течение теплоносителя, также показано, что наибольшие потери давления происходят на перфорированных чехлах.

Однако полностью равномерного подогрева теплоносителя по высоте ТВС МТ получить не удалось, были выявлены области сильного подогрева теплоносителя, что является недостатком рассмотренной конструкции тепловыделяющей сборки и говорит о необходимости проведения дальнейших исследований в этой области.

Литература

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

В.И. Тройнов, асп., М.Р. Нургалиев, Р.С. Рачков, студенты;
рук. А.М. Зимин, д.т.н., проф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СПЕКТРОВ

Молекулы изотопов водорода играют важную роль в балансах энергии и частиц пристеночной плазмы токамака. Распределение молекул по вращательным уровням зависит от электронной плотности и температуры поверхности первой стенки (лимитера), что дает возможность оценки этих параметров по молекулярному спектру.

Сложность распознавания спектра дейтерия заключается в большом количестве молекулярных переходов для узкого спектрального диапазона длин волн и взаимном наложении полос на различных участках спектра. Некоторые вращательные линии не удается разрешить даже при использовании оборудования со спектральным разрешением 0,4…1,0 Å. Ситуация еще более осложняется в случае наложения нескольких электронных систем и при наличии в камере водорода, который имеет свой, отличный от дейтерия, молекулярный спектр.

Авторами разработан программный комплекс для автоматизированной обработки спектра, по данным работы [1] создан электронный атлас электронно-колебательно-вращательных переходов протия и дейтерия.

Для анализа неразрешенных участков спектра комплекс дополнен программными модулями, реализующими математические методы (см., например, [2]) улучшения разрешающей способности метода посредством обработки и анализа с учетом аппаратных функций используемых спектральных приборов.

Результатом работы программного модуля является массив длин волн, соответствующих предполагаемым вращательным линиям. Его содержание редактируется в соответствии с таблицами атласа. Далее определяются интенсивности, соответствующие найденным вращательным линиям, а затем с учетом аппаратной функции строится новый расчетный спектр.

Такой подход дает достаточно хорошее совпадение исходного и расчетного спектров, что позволяет сделать вывод о корректности применяемых методик. Разработанный комплекс программ предполагается применить для анализа динамики молекулярной компоненты в пристеночной плазме токамака.

Литература

1. **Dieke G.H.** The Molecular Spectrum of Hydrogen and its isotopes // J. Mol. Spec. Ref. Data. 1958. Vol. 2. No 1–6. P. 494—517.

2. **Сизиков В.С.** Обратные прикладные задачи и MatLab. СПб.: Изд-во «Лань», 2011. — 256 с.

В.В. Шумаев, студ.; рук-ли С.В. Рыжков, к.т.н., доц.;
В.В. Кузенов, к.т.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

НАХОЖДЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТОМАСА–ФЕРМИ

Объектом данного исследования является плазма с температурой $T > 10^4$ К (~ 1 эВ) и плотностью $10^{-3} < \rho < 10^3$ г/см^3 ($1 < \rho < 10^6$ кг/м^3), находящаяся во внешнем магнитном поле $0 < B < 10^3$ Тл. Плазма таких параметров применяется для задач управляемого термоядерного синтеза. Под термодинамическими функциями подразумеваются функции следующего вида: $P = P(T,\rho)$, $E = E(T,\rho)$, $S = S(T, \rho)$, где P — давление плазмы; E, S — ее внутренняя энергия и энтропия, приходящиеся на единицу массы.

В настоящее время базы данных теплофизических свойств веществ (ТЕФИС, ИВТАНТЕРМО, SESAME) не учитывают влияние внешнего магнитного поля на термодинамические функции плазмы.

Разработана программа для ЭВМ, которая на основе квантово-статистической модели Томаса—Ферми [1—3] рассчитывает термодинамические функции вещества с заданной температурой и плотностью с учетом влияния внешнего магнитного поля на электроны [4]. Результаты расчета без магнитного поля показывают удовлетворительное соответствие с известными данными [2]. Также проведено сравнение результатов с пакетом программ EIP EOS [5], предназначенным для астрофизических задач. Результаты данной работы могут быть полезными при моделировании процессов в термоядерной плазме и позволят расширить существующие базы данных теплофизических свойств веществ.

Литература

1. **Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.** Физика ударных волн и высокотемпературных явлений гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

2. **Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б.** Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния. М.: Физматлит, 2000.

3. **Shumaev V.V.** Thermophysical properties of magnetized laser plasma evaluated by Thomas-Fermi model // Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN-13): International Symposium abstracts. St. Petersburg, Pushkin, 2013, p. 42.

4. **Смирнов С.Г., Холин С.А.** Уравнение Томаса–Ферми для атома в магнитном поле с учетом ориентации спина электронов // Забабахинские научные чтения: Тр. 5-й Межд. конф. РФЯЦ — ВНИИТФ, 1998, с. 310–315.

5. **Potekhin A. Y., Chabrier G.** Equation of state for magnetized Coulomb plasmas // Astron. Astrophys. 2013. 550. A43.

Секция 41

ТЕПЛОФИЗИКА

Председатель секции — д.ф.-м.н., профессор О.А. Синкевич
Секретарь секции — к.т.н., доцент В.В. Глазков

Д.А. Бирюков, асп.; рук. Д.Н. Герасимов, к.ф.-м.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ КАВИТАЦИИ

При механическом воздействии на жидкость (например, воду или глицерин) может возникать едва заметное свечение. Если данное свечение возникает под действием ультразвуковых колебаний, созданных, например, магнитострикторами, то такое свечение принято называть сонолюминисценцией (СЛ). На сегодняшний день принято разделять СЛ на однопузырьковую и многопузырьковую. СЛ — достаточно широко известное явление свечения жидкостей, однако общепринятой теории возникновения данного свечения до сих пор нет; доминирующие концепции можно в известной степени подразделить на тепловые и электрические.

Помимо воздействия ультразвуком, свечения жидкости можно добиться и иным путем: прокачиванием жидкости через узкий канал (около 1 мм) под высоким давлением (30–40 атм. и выше). Получаемая таким образом гидролюминесценция (ГЛ), возможно, имеет общую природу с СЛ, а возможно, и нет.

На кафедре ИТФ проводятся экспериментальные исследования, имеющие целью установления связи между этими двумя физическими явлениями, на таких веществах, как масло И-40А, глицерин и вода [1].

В ходе экспериментов выявлено, что протекание жидкости через диэлектрический канал с узким отверстием может сопровождаться возникновением разноименных зарядов на участках канала с высоким и низким давлениями. Данное явление теоретически можно объяснить электрокинетическим эффектом, который возникает при течении жидкости через канал. Подобный эффект, в свою очередь, может быть причиной возникновения неустойчивой плазмы, свечение которой образует явления ГЛ.

Также экспериментально получены данные, подтверждающие, что процесс СЛ сопровождается генерацией напряжения в жидкости.

Литература

1. **Свечение** жидкости в узком канале как триболюминесценция / Д.А. Бирюков, М.И. Власова, Д.Н. Герасимов, О.А. Синкевич // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 5.

Э.Р. Галиахметова, студ.; рук. Д.Н. Герасимов, к.ф.-м.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

Аномальная диффузия (АД) — процесс, при котором среднее смещение блуждающей частицы x за время t подчиняется закону $x \sim t^{\alpha}$, где показатель степени отличен от 0,5 (при $\alpha > 0{,}5$ — так называемая супердиффузия, при $\alpha < 0{,}5$ — субдиффузия). АД встречается в самых разнообразных процессах: от просачивания жидкости в пористых средах до диффузии частиц в плазме.

Обычное конвективно-диффузионное описание некорректно для аномальной диффузии. Среди возможных математических моделей для АД наилучшим, вероятно, является описание, основывающееся на фрактальном (дробно-дифференциальном) уравнении диффузии — уравнении, содержащем дробные производные по пространству и/или по времени. Как показано в [1], применение фрактального уравнения диффузии весьма хорошо описывает экспериментальные данные, в том числе — для случая неавтомодельного распространения.

В данной работе исследуется применение фрактального уравнения диффузии для моделирования АД ионов в жидкости, а также влияние подобного движения на релаксацию внутреннего напряжения, генерируемого в такой жидкости. Рассматриваются как аналитические, так и численные решения фрактального уравнения.

При численном интегрировании уравнения диффузии с использованием дробной производной Грюнвальда—Летникова наиболее простой реализацией является явная схема, для которой получено условие, аналогичное известному условию Куранта для обычного уравнения теплопроводности/диффузии. Численное моделирование показало адекватность полученного критерия устойчивости разностной схемы.

Литература

1. **Gerasimov D.N., Kondratieva V.A., Sinkevich O.A.** An anomalous non-self-similar unfiltration and fractional diffusion equation // Physica D. 2010. Vol. 239. No 16. P. 1593—1597.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОСТАВНОГО ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРА КРУГЛОГОДИЧНОГО ДЕЙСТВИЯ

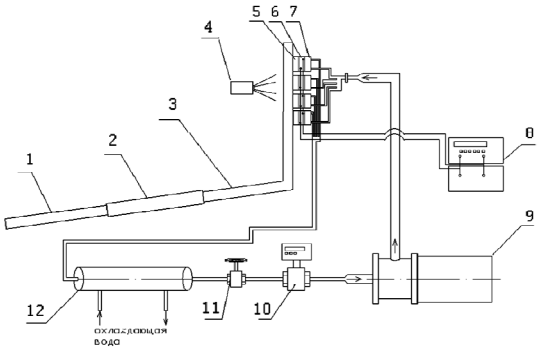


Рис. 1. Составная слабонаклонная тепловая труба

Термостабилизаторы круглогодичного действия (ТКД) применяются для замораживания грунтов при строительстве и эксплуатации различных объектов в летний период времени в районах вечной мерзлоты [1]. В случае протяженных объектов целесообразно применять составной ТКД, большая часть которого расположена с небольшим наклоном. В работе исследуется составной термостабилизатор (рис. 1), представляющий собой два термосифона, заполненные фреоном 22 и скрепленные между собой связующим кожухом. Тепловой поток отводится системой охлаждения, состоящей из четырех модулей Пельтье, четырех радиаторов и четырех датчиков теплового потока. При исследовании термического сопротивления термостабилизатора определяются отводимый тепловой поток и распределения температур на поверхностях 1-й и 2-й тепловых труб и участке соединения. Измерения проводятся при различных углах наклона термостабилизатора.

Литература

1. **Разработка** термостабилизатора круглогодичного действия / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, И.Ф. Прокопенко, Ю.П. Штефанов // Материалы Межд. научно-практич. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос», Тюмень, 7—10.11.2013.

А.Р. Забиров, асп.; рук-ли В.В. Ягов, д.т.н., проф.,
М.А. Лексин, к.т.н., н.с. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

В настоящее время одним из самых эффективных методов отвода тепла при чрезвычайно высокой плотности теплового потока является кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения.

В работе [1] представлены результаты экспериментального исследования режимов охлаждения высокотемпературных никелевых шаров в насыщенной и недогретой жидкости при атмосферном давлении. При этом наблюдались различные режимы теплообмена. Помимо хорошо изученного классического пленочного кипения насыщенной жидкости наблюдается также и высокоинтенсивный режим микропузырькового кипения воды при недогревах более 30 К, описанного впервые английскими исследователями [2].

Сейчас на кафедре ИТФ НИУ «МЭИ» заканчивается создание новой экспериментальной установки по изучению процессов интенсивного охлаждения в недогретой жидкости. В качестве материалов при изготовлении шаров планируется использовать медь, никель, нержавеющую сталь различных марок.

Чтобы исключить окисление меди и, возможно, дюраля в воздушной среде, в новой герметичной экспериментальной установке предусмотрено проведение исследований в атмосфере азота.

Главная часть новой экспериментальной установки представляет собой вертикальную трубу большого диаметра, разделенную металлическими шторками на две зоны: зону охлаждения и зону нагрева. В зоне нагрева располагается рабочая катушка индуктора для равномерного нагрева образцов до заданной температуры. Зона охлаждения заполняется выбранной однокомпонентной жидкостью или бинарной смесью.

Кроме того, новая установка позволит проводить эксперименты при повышенном давлении, что существенно увеличит диапазон доступных недогревов.

Литература

1. **Ягов В.В., Лексин М.А., Павлов П.В.** Исследование процессов теплообмена при интенсивном охлаждении металлических тел в недогретой жидкости // Труды РНКТ-5. 2010. Т.5. С. 112–115.

2. **Zvirin Y., Hewitt G.F., Kenning D.B.R.** Boiling on free falling spheres: drag and heat transfer coefficients // Exp. Heat Transfer. 1990. Vol. 3. P. 185—214.

А.Г. Захаров, асп.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ЗАКРУЧЕННОЙ ЛЕНТОЙ

В данный момент можно утверждать, что хорошо изученным является лишь теплообмен жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) в круглой трубе [1], данных же по теплообмену в каналах более сложной формы, а тем более с закруткой, крайне мало. Вместе с тем необходимым элементом для обоснования безопасности и работоспособности современных ядерных энергоустановок, предполагающих закрученное течение ЖМТ [2], является проведение CFD-расчетов. Но их результатам нельзя доверять, пока не будут получены надежные экспериментальные данные, необходимые для верификации CFD-кодов.

Для получения таких данных по заказу ОАО «НИКИЭТ» на кафедре ИТФ НИУ «МЭИ» в настоящее время проходит серия экспериментов по исследованию теплообмена ртути в кольцевом канале с закрученной лентой на стенде, подробно описанным в [3].

Представленная же работа посвящена предтестовому расчету данного эксперимента. Расчеты проводились в диапазоне $\mathrm{Re} = 10^4 \div 5 \cdot 10^4$, при $\mathrm{Pr} = 0{,}025$ с использованием кода Fluent 14.5. Моделирование турбулентности осуществлялось с помощью стандартной k–ε[4] и низкорейнольдсовой AKN моделей [5]. Среди основных результатов стоит отметить то, что температурный максимум располагается не вплотную у ребра в застойной зоне, как это ожидалось, а несколько смещен относительно него по осевой координате. Также установлено, что при существующей конфигурации опытного участка измерения температурных полей, возможно, будут проходить в условиях отсутствия термической стабилизации. Полученные из предтеста данные были использованы для планирования проведения экспериментальных исследований.

Литература

1. **Субботин М.Н**., **Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В.** Обобщающая зависимость коэффициента переноса тепла в потоке жидкости // ТВТ. 1965. Т.3. № 3.

2. **Габараев Б.А., Смирнов Ю.Б., Черепнин Ю.С.** Атомная энергетика XXI века. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

3. **Разуванов Н.Г.**Исследование МГД-теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе: Дис. … докт. техн. наук. М., МЭИ, 2011.

4. **LaunderB.E., SpaldingD.B.** Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972.

5. **AbeK., KondohT., Nagano Y.**A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows. Flow field calculations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1994. Vol. 3. No 1.

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

КОНВЕКЦИЯ В СЛОЕ МОРСКОЙ ВОДЫ, ВЫЗВАННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Исследуется задача о возникновении конвекции в плоском слое вязкой, теплопроводной морской воды при падении на слой электромагнитной волны. В слое при поглощении электромагнитного излучения происходит нагрев жидкости. На свободной поверхности — турбулентный теплообмен с окружающим слой воздухом (нижняя стенка слоя считается адиабатической) (рис. 1). Исследование проводится в приближении Буссинеска, но с учетом нелинейного джоулева тепловыделения (электропроводность воды зависит от температуры). Целью работы является установление условий возникновения стационарных режимов без движения и режимов с конвекцией. Спецификой данной проблемы является то, что кроме стандартного числа Рэлея названные выше режимы зависят от интенсивности джоулева тепловыделения в объеме жидкости и интенсивности турбулентного теплообмена с окружающей средой. Такая задача возникает при воздействии электромагнитной волны на жидкость и при нагреве солнечным излучением.

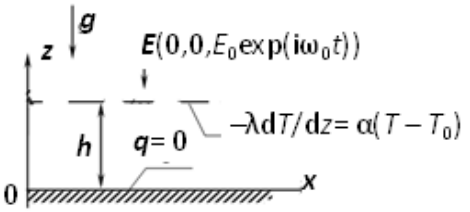


Рис. 1

Литература

1. **Космические** солнечные электростанции: проблемы преобразования энергии и ее использования на поверхности земли / О.А. Синкевич, Д.Н Герасимов, В.В. Глазков и др. // Вестник МЭИ. 2010. № 3.

О.Э. Иванова, студ.; рук-ли О.В. Соловьева, ст. преп.
(КГЭУ, г. Казань),
С.А. Соловьев, к.ф.-м.н., н.с. (КФУ, г. Казань)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АППАРАТОВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ТЕПЛООБМЕНА

В настоящее время в химической промышленности активно используются аппараты, работающие с псевдоожиженным слоем. Преимущества промышленного использования аппаратов псевдоожиженного слоя заключается в конструктивной простоте, интенсификации тепломассообмена, перемешивания химических элементов. Каждый конструктивный элемент конкретного аппарата может вносить решающее значение в эффективность работы в целом. В изучении псевдоожижения получил распространение эйлеро-эйлеров подход моделирования, когда и несущая (газ, жидкость) и дискретная (твердая) фаза представляются непрерывными фазами. Для учета особенностей движения фаз в псевдоожиженном слое используется кинетическая теория газов, добавляется уравнение, описывающее изменение кинетической энергии гранул вследствие их столкновений (см., например, [1]).

В настоящей работе представлены результаты расчетов модели аппарата псевдоожиженного слоя газ — твердый пылевидный катализатор.

Газ подается в нижней части аппарата, а твердые частицы засыпаются в верхней части и падают вниз. Считается, что в аппарате происходит химическая реакция с поглощением тепла. Для поддержания температуры поступающие частицы имеют температуру большую, чем температура газа. Расчеты проводились численно методом конечных объемов. Проведены расчеты монодисперсного слоя осредненного размера частиц катализатора и полидисперсного слоя осредненного и мелкого размеров частиц катализатора. Вычислены распределенные и интегральные характеристики. Проведены оценки эффективности протекания химических реакций, требующих наличие нагретого катализатора. Предложены варианты и расчеты модифицированных конструкций аппарата. Проведен анализ гидродинамических и температурных полей. Сделаны выводы по определяющим факторам конструктивных особенностей исследуемой модели аппарата, влияющих на эффективность теплообмена и протекания химических реакций.

Литература

1. **Gidaspow D.** Multiphase Flow and Fluidization. Boston :Academic Press, 1994.

Н.А. Кочетов, асп.; рук. В.Д. Локтионов, доц., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Широкомасштабное внедрение ядерной энергетики с использованием новых проектов АЭС с ВВЭР делают необходимым наряду с повышением технико-экономических показателей АЭС обеспечение безопасности не только при прохождении проектных аварий, но также разработку мероприятий по управлению тяжелыми запроектными авариями с целью минимизации их последствий. В тяжелых запроектных авариях с потерей теплоносителя происходит разрушение и расплавление активной зоны. Вследствие этого расплавленные элементы конструкции реактора, а при достаточно высоких температурах и топливо, перемещаются на днище корпуса реактора, образуя кориум.

Существуют несколько концепций локализации расплава активной зоны:

1) внутрикорпусное удержание;
2) внекорпусное удержание расплава:

а) удержание расплава в специальном помещении;

б) удержание расплава в специальном устройстве — УЛР или в так называемой «ловушке расплава».

Как показывают оценки, проведенные в [1] и [2] и ряде экспериментов (например, MASKA), при запроектной аварии с плавлением активной зоны наблюдается стратификация (расслоение) кориума. Снизу оксидная фаза с большей плотностью, сверху — металлическая фаза с меньшей плотностью. При этом объемное энерговыделение сосредоточено в основном в оксидной фракции, а наибольшая плотность теплового потока на корпус реактора наблюдается в металлическом слое.

В данной работе проведено расчетное исследование конвективного теплообмена в металлической фазе ванны расплава при различных условиях охлаждения расплава с целью определения тепловых нагрузок на корпус реактора.

Литература

1. **Орлов В.Е.** Разработка методики расчета теплогидравлических процессов в проблеме удержания расплава активной зоны в корпусе реактора: Дис. … канд. техн. наук. М., 1997.

2. **Khabensky V.B., Granovsky V.S., Beshta S.V.** VVER steel corrosion during in-vessel retention of corium melt. The 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008).

О.Н. Лямина, асп.; рук-ли В.П. Семенов, д.т.н., проф., С.И. Кадченко, д.ф.-м.н., проф. (МаГУ, г. Магнитогорск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕСА РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ КОНДЕНСАТА ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ

В научной литературе достаточно подробно изучены задачи растекания капель по плоским твердым поверхностям и почти полностью отсутствует теоретическое описание процесса растекания капель, падающих на поверхность горизонтальных цилиндрических труб. В ряде научных работ экспериментально доказано, что зоны локального перетекания капель могут существенно влиять на процессы теплообмена. Поэтому актуальна разработка математических моделей, описывающих теплообмен при конденсации пара на горизонтальных трубах и учитывающих поверхностное натяжение, приводящее к дискретному перетеканию конденсата в виде капель и струй.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые численными методами моделируется растекание капель по круглым цилиндрическим поверхностям.

Автор внес непосредственный вклад в постановку задачи, определение граничных и начальных условий, обработку и анализ численных результатов.

В основу математической модели, описывающей исследуемый процесс, положена система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнений Навье—Стокса, неразрывности и теплопроводности для движущихся сред. В модели процесса растекания капли жидкости дополнительно учитывается зависимость кинематической вязкости, теплопроводности и теплоемкости жидкости от температуры. Граничные и начальные условия задаются с учетом значений этих параметров в промышленных конденсаторах пара. Результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [1].

Результат математического моделирования будет использован для корректировки расчетных методик при проектировании компактных теплообменных аппаратов с конденсацией пара на наружной поверхности пучков горизонтальных труб с целью повышения энергоэффективности теплообменных аппаратов.

Литература

1. **Лямина О.Н., Семенов В.П., Кадченко С.И.** Математическое моделирование процесса нагрева растекающейся по горизонтально расположенной цилиндрической трубе капли вязкой жидкости // Теплоэнергетика. 2013. № 9.

О.А. Макеенкова, асп.; рук. А.Ф. Богатырев, д.т.н., проф.
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)

ТЕРМОДИФФУЗИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СООТНОШЕНИЯХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ

При экспериментальном исследовании термодиффузионного разделения в трехкомпонентных газовых системах было отмечено, что при определенных соотношениях концентраций термодиффузионная постоянная α^T одной из пар компонент обращается в ноль или принимает отрицательное значение.

На описанной в работе [1] установке было проведено исследование термодиффузии в трехкомпонентных системах H_2 — CH_4 — Ar и H_2 — He — N_2. Часть измерений представлена в табл. 1. Здесь же приведены значения термодиффузионной постоянной, вычисленной согласно формуле, предложенной в работе [2].

Таблица 1

Объемная конц. добав. комп. c_i, %	Термодиффузионная постоянная α^T					
	Эксперимент, $\cdot 10^2$			Расчет согласно [2], $\cdot 10^2$		
	α_{12}^T	α_{13}^T	α_{23}^T	α_{12}^T	α_{13}^T	α_{23}^T
c_{H_2}	H_2 — CH_4 — Ar, $c_{CH_4}/c_{Ar} = 1,005$, $T_1 = 280$ К, $T_2 = 600$ К					
49	35,7	38,5	2,8	35,9	38,9	2,9
55	39,7	41,2	1,2	39,5	40,6	1,1
67	48,1	45,1	-3,0	47,6	44,3	–3,3
79	57,5	49,6	-7,9	56,7	48,4	–8,3
c_{N_2}	H_2 — He — N_2, $c_{H_2}/c_{He} = 0,740$, $T_1 = 280$ К, $T_2 = 800$ К					
40,0	3,7	33,1	29,4	3,5	32,3	28,8
57,5	0,8	28,0	27,1	0,7	27,7	27,0
72,0	–1,3	25,0	26,3	–1,4	24,8	26,2
83,2	–3,2	22,4	26,0	–2,9	23,0	25,9

Как видно из таблицы, экспериментальные данные согласуются с расчетом в пределах 10 %.

Литература

1. **Куликова О.А.** Методика измерения термодиффузионного разделения в многокомпонентных газовых системах // Информационные технологии, энергетика, экономика: Тр. 9-й МНТК. Смоленск: филиал МЭИ в г. Смоленске, 2012. Т. 2.

2. **Богатырев А.Ф., Куликова О.А., Незовитина М.А.** Метод расчета термодиффузионного разделения в трехкомпонентных газовых системах // Научное обозрение. 2013. № 3.

А.М. Марданова, студ., И.Р. Габдрахманов, асп.;
рук. И.А. Попов, д.т.н., проф. (КНИТУ-КАИ, КГЭУ, г. Казань)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ВЫЕМКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

При создании высокоэффективных теплообменных устройств, реализующих вынужденное течение теплоносителей, наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена является поверхностная интенсификация, в том числе с помощью систем сферических, цилиндрических и траншейных выемок [1].

Результаты исследования теплоотдачи и гидродинамики при обтекании цилиндрических выемок изложены в работах К. Вигхарда, Е.М. Спэрроу, А.А. Халатова, С. Муна, М. Хивады, В.И. Терехова, Ф. Гренарда, Ф. Лиграни и др. Несмотря на накопленный объемный материал по исследованию осредненных и локальных характеристик гидродинамики и теплообмена в каналах с такими выемками, в литературе практически отсутствуют инженерные рекомендации по определению режимов обтекания и методики расчетного прогнозирования коэффициентов гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с данными видами интенсификаторов теплообмена.

В работе представлены результаты экспериментального исследования коэффициентов гидросопротивления и осредненной теплоотдачи в каналах энергетического оборудования с интенсификаторами теплоотдачи в виде цилиндрических выемок с h/d = 0,1÷0,5 в диапазоне чисел Re = 100÷30 000. Показана интенсификация теплоотдачи до 60 % при умеренном росте гидросопротивления. Дан сравнительный анализ интенсификаторов по теплогидравлической эффективности. Установлены механизмы интенсификации теплоотдачи, описана физическая модель течения и теплообмена в цилиндрических выемках. Даны рекомендации для инженерных расчетов теплообменного оборудования с данными интенсификаторами. Обоснованы оптимальные условия использования исследованных интенсификаторов теплоотдачи.

Литература

1. **Теплогидравлическая** эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев и др.; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. — 560 с.

Е.В. Михайлов, студ.; рук-ли Ю.А. Кузма-Кичта, проф., д.т.н., Р.Х. Хасанов, вед. инж. (НИУ «МЭИ»); Н.Я. Паршин, к.т.н., г.н.с., С.С. Базюк, к.т.н. (НИИ НПО «Луч», г. Подольск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ИМИТАТОРОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВВЭР И PWR ПРИ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

При расчете стадии повторного залива тепловыделяющих сборок ядерных реакторов с помощью существующих кодов получены существенные расхождения с опытными данными [1]. Одна из причин — недостаточные исследования основных характеристик повторного залива.

Сложные геометрия каналов и многообразие структур нестационарного многофазного потока, высокая температура стенки обусловливают трудности моделирования и недостаточную изученность процессов тепломассообмена при аварийном охлаждении. Формирующийся в процессе нагрева модельной ТВС оксидный слой также влияет на характеристики повторного залива и форму кривой кипения [2]. Имеющиеся данные по повторному заливу модельных сборок ВВЭР крайне ограничены.

В работе получена зависимость температуры прекращения пленочного кипения от режимных параметров на основе результатов экспериментов, проведенных на модельных ТВС стендов RBHT (США, Пенсильвания), ПАРАМЕТР (НИИ НПО «Луч», г. Подольск) и СВД (ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск) [3,4]. Полученная зависимость может быть использована при проведении расчетов аварийных режимов с помощью существующих кодов, а также при разработке динамической кривой кипения.

Литература

1. **Верификация** теплогидравлических кодов на стандартной задаче нижнего повторного залива / А.Д. Ефанов, В.Н. Виноградов, Э.Ф. Гальченко и др.// Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 16—20.

2. **Singha J., Hochreiter L.E., Cheung F.B.** Effects of surface roughness, oxidation level and liquid subcooling on the minimum film boiling temperature // Experimental Heat Transfer. 2003.Vol. 16. P. 45—60.

3. **Hochreiter L.E., Cheung F.B., Lin T.F.** RBHT Reflood Heat Transfer Experiments Data and Analysis. The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.

4. **Базюк С.С., Паршин Н.Я., Кузма-Кичта Ю.А.** Исследование расхолаживания модельных ТВС ВВЭР и PWR при максимальной проектной и запроектной авариях // 8-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 2013 г. С. 12.

А.Т. Нысанбаева, студ.; рук. О.В. Федоренко, к.ф.-м.н.
(КазНУ, г. Алматы)

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ДЮФУРА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДИФФУЗИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Диффузионная неустойчивость возникает в многокомпонентных газовых смесях за счет возникновения пространственной неоднородности плотности [1], вызванной градиентом концентрации. Градиент концентрации приводит к возникновению градиента температуры — эффекту Дюфура [2].

В данной работе рассматривается влияние эффекта Дюфура на возникновение гравитационной конвекции в замкнутой области.

Предположим, что эффект Дюфура вызывает небольшие возмущения полей температуры и концентрации. Диффузионные потоки тепла и массы можно записать в виде [3]

$$J_T = -\left(k + \frac{\rho D_T^2}{D} N \right) \nabla T - \rho D_T N \nabla c \,, \; J = -\rho D N \nabla c \,,$$

где D_T и D — коэффициенты термодиффузии и диффузии; ∇c и ∇T — градиенты концентрации и температуры; ρ — плотность смеси.

Параметр N характеризует эффект Дюфура и определяется через химический потенциал смеси. Как видно из потоков, эффект Дюфура усиливает теплопроводность и вызывает дополнительный поток тепла под действием градиента концентрации. Результирующий поток тепла зависит от физических свойств смеси и граничных условий. Например, в замкнутой области с массонепроницаемыми стенками массовый диффузионный поток в стационарных условиях исчезает, что соответствует случаю равенства двух противоположно направленных потоков тепла вызванных эффектом Дюфура.

Следовательно, в замкнутых системах возникновение пространственной неоднородности плотности не может быть вызвано эффектом Дюфура.

Литература

1. **Косов В.Н., Селезнев В.Д.** Аномальное возникновение свободной гравитационной конвекции в изотермических тройных газовых смесях. Екатеринбург: УрО РАН, 2004.

2. **Boushehri A., Afrashtehfar S.** Dufour effect in gases // Bulletin of the chemical society of Japan. 1975. Vol. 48(8).

3. **Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.** Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.

Е.В. Перцев, М.Ф. Халитова, студенты;
рук. Ф.Г. Халитов, д.х.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

ДИПОЛЬНЫЕ МОМЕНТЫ И ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ПОЛОС В ИК-СПЕКТРАХ МОЛЕКУЛ $ЭF_3$

Интерес к работам в области теплообмена излучением сохраняется многие годы. Теплообмен излучением играет исключительно важную роль в современной технике и технологии. Экспериментально измеряемыми параметрами в молекулярной спектроскопии являются спектральный состав и интенсивность излучения. На практике основная информация о коэффициентах поглощения определяются путем проведения трудоемких экспериментов.

В то же время имеются модели, которые позволяют в принципе теоретически оценить и рассчитать эти коэффициенты и сопоставить с колебательными спектрами. Одной из теорий является квантовая механика. Расчеты проводятся многообразными методами с использованием различных базисов. Однако результаты расчетов даже для простейших молекул существенно отличаются в зависимости от используемого выбора параметров.

Второй путь — это расчет частот и форм нормальных колебаний с последующим вычислением электрооптических параметров (производных дипольных моментов от нормальных или естественных координат).

В работе сделана попытка оценки величин, связанных с интенсивностями поглощения в колебательных спектрах молекул $ЭF_3$ (Э = N, P, As, Sb). По эмпирически полученным функциям зависимостей валентных углов α и дипольных моментов μ от потенциалов ионизации электронов определены изменения дипольных моментов молекул ($\Delta\mu$) при симметричных валентных (ν_s) и деформационных (δ_s) колебаниях. Рассчитанные значения $\Delta\mu$ позволили оценить величины абсолютных интенсивностей A полос ν_s и δ_s по соотношению [1]

$$A = \frac{8\pi^3 N\nu}{3hc}\langle 0 \,|\, \Delta\mu \,|\, 1\rangle^2 .$$

Полученные данные хорошо согласуются с экспериментально измеренными величинами для полос поглощения ν_s и δ_s молекул NF_3 и AsF_3.

Литература

1. **Орвил-Томас У., Сузуки С., Райли Г.** Интенсивности инфракрасных полос и полярные свойства молекул. В кн. «Колебательная спектроскопия» / под ред. А. Барнса и У. Орвил-Томаса. М.: Мир, 1981. — С. 480.

А.Р. Семенов, студ., М.В. Шустов, асп.;
рук-ли Ю.А. Кузма-Кичта, проф., А.В. Лавриков, к.т.н.; (НИУ «МЭИ»)

ИСЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ В МИКРОКАНАЛЕ С НАНОРЕЛЬЕФОМ

Применение микроканальных теплообменников с нанорельефом для охлаждения электронных компонентов является перспективным в силу их эффективности, малых размеров и большей надежности по сравнению с микроканалами без рельефа [1]. В работе представлены результаты исследования теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды (70—80 °С) в плоских микроканалах с нанорельефом в диапазоне нагрузок от 0 до 4000 Вт/м^2 и скоростей от 0,04 до 1 м/с. На рис. 1 представлена схема установки. Размеры микроканала: высота — 200 мкм, ширина — 3 мм, длина — 13,7 мм. Исследована кривая кипения в области кризиса теплоотдачии перепад давления в плоском канале. Проведена видеосъемка.

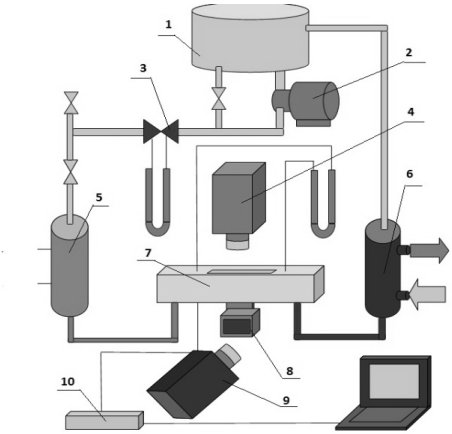


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — бак; *2* — насос; 3 — расходомер; *4* –скоростная видеокамера; *5* — предварительный нагреватель; *6* — конденсатор; *7* — рабочий участок; *8* — нагревательный блок; *9* — тепловизор; *10* — плата сбора данных

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00600-А.

Литература

1. **Исследование** теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды в канале малого диаметра / К. Сузуки, Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков и др. // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 7. С. 307—311.

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

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ И МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ТЕПЛЕ

Большинство технологических процессов, работа многих механизмов и систем сопровождается выделением большого количества тепловой энергии, которая не используется, а рассеивается в окружающей среде и называется «сбросное тепло», являющееся низкопотенциальным. В данной работе рассматривается возможность использования тепла выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания автомобиля для привода кондиционера с помощью дополнительного рабочего цикла на фреоне (рис. 1), [1]. На рисунке показаны: *1* — воздушный компрессор; *2* — блок цилиндров ДВС; *3* — турбина; *4* — теплообменник отработавших газов; *5* — система выпуска выхлопных газов; *6* — трубопровод системы использования отходящего тепла; *7* — ротационная турбина; *8* — автомобильный кондиционер; *9* — конденсатор/рекуператор; *10* — насос хладагента; *11* — охлаждающий контур двигателя; *12* — трубопровод системы охлаждения двигателя; *13* — насос рабочей среды; *14* — вентили.

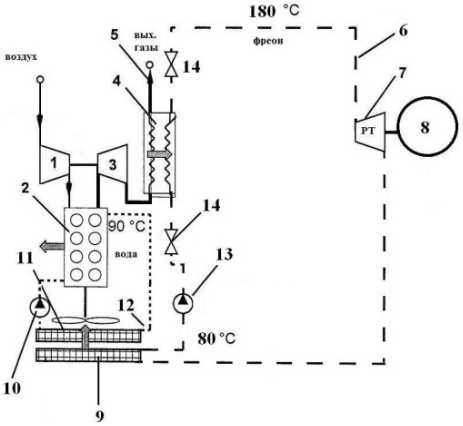


Рис. 1. Схема работы автомобиля с циклом на фреоне

Как показывают расчеты, с помощью такого решения достигается сокращение расхода топлива на 10—15 % и осуществляется бесперебойная работа кондиционера во время движения.

Литература

1. **ПФЛАНЦ Тассило (DE)**. Приводной узел автомобиля (патент РФ № 2478810). Москва, ООО «Юридическая фирма Городисский и Партнеры», 2011.

Р.Т. Фатхиев, А.С. Шурыгин, студенты, А.В. Васин, асп.;
рук-ли Ю.А. Кузма-Кичта, д.т.н., проф.; А.В. Лавриков, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОРЕЛЬЕФА И ГИДРОФОБИЗАТОРА ПРИ КИПЕНИИ И КОНДЕНСАЦИИ

Теплообменные аппараты, передача тепла в которых сопровождается кипением и конденсацией, широко распространены в технике, и интенсификация теплообмена в них имеет важное значение. Интенсификация теплоотдачи при кипении может быть достигнута за счет микро-, нанорельефа и гидрофобизатора. Капельная конденсация — эффективный метод передачи тепла, и получить ее можно путем применения поверхностно-активных веществ [1]. Имеющиеся экспериментальные данные по исследуемой теме ограничены.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния нанорельефа и гидрофобизатора на интенсификацию теплоотдачи при кипении и конденсации в большом объеме.

Согласно методике в опытах измеряются температуры рабочей среды и стенки, напряжение и сила тока на рабочем участке или нагревателе рабочей камеры. Нанорельеф поверхности получен с помощью метода, описанного в патенте [2] (рис. 1); в качестве гидрофобизатора используется полимер, который в совокупности с наночастицами позволяет получить краевой угол капли величиной более 100° (рис.2).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-08-00086-а.

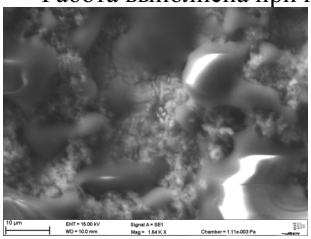


Рис. 1. Фотография поверхности SiC+полимер с электронного микроскопа

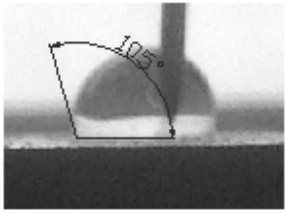


Рис. 2. Статический краевой угол для поверхности SiC+полимер

Литература

1. **Интенсификация** тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев и др. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008.

2. **Патент #2433949.** Способ формирования нанорельефа на теплообменных поверхностях изделий / Ю.А. Кузма-Кичта и др. 2011.

Е.Н. Щукина, студ.; рук. В.В. Глазков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО КОНТАКТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАЛЛА С ХОЛОДНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Паровой взрыв — сложное физическое явление, сопровождающее прямой контакт горячей жидкости с охладителем и характеризующееся интенсивным межфазным взаимодействием. Подобные процессы могут иметь место при тяжелых авариях на атомных электростанциях, в промышленности, металлургическом производстве, а также в природе при извержениях подводных вулканов [1].

В данной работе решалась задача о начальной стадии процесса парового взрыва, когда происходит сближение и последующее соприкосновение холодной жидкости с горячим металлом, в том числе рассматривались случаи, когда поверхность металла была покрыта оксидной пленкой. Данная работа является продолжением [2]. Процесс сближения двух поверхностей моделировался численно, в качестве горячего металла использовались параметры стали, в качестве холодной легкокипящей жидкости принималась недогретая до температуры насыщения вода. В работе были учтены кинетические эффекты, ограничивающие тепловой поток на малых расстояниях, а также радиационный тепловой поток со стороны металла. Исследовалось влияние тонких оксидных пленок на поверхности металла на характер изменения температуры сталкивающихся поверхностей. В результате получены графики зависимости температуры приповерхностных слоев от времени на границе раздела вода — оксид при разных толщинах оксидной пленки и разных скоростях движения воды. Показано, что даже без учета кинетических эффектов первоначально недогретая до температуры насыщения жидкость достигает температуры насыщения только на расстоянии в несколько микрон от нагретой поверхности металла. Рассмотрен процесс взрывного вскипания жидкости непосредственно после ее контакта с раскаленным металлом.

Литература

1. **Fletcher D.F.** Steam Explosion Triggering: a Review of Theoretical and Experimental Investigations // Nucl. Eng. and Des. 1995. Vol. 155. P. 27.

2. **Глазков В.В., Киреева А.Н.** Эффект прямого контакта жидкости с поверхностью при закалке // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 3. С. 475—477.

Е.И. Юрин, студ.; рук. Д.Н. Герасимов, к.ф.-м.н., доц., (НИУ «МЭИ»)

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСПАРИВШИХСЯ ЧАСТИЦ ПО СКОРОСТЯМ

Методы молекулярной динамики позволяют осуществить почти прямое (так как неизвестен потенциал взаимодействия) моделирование ансамбля частиц. В работах, где необходимо знание функции распределения (ФР), она предполагается максвелловской с температурой поверхности жидкости [1, 2]. Однако принятие такого условия безосновательно. В данной работе выведены выражения для ФР частиц, испаряющихся в вакуум. ФР частиц по продольной — направленной от поверхности испарения — скорости оказывается существенно немаксвелловской.

Аналитическое выражение сравнивается с результатами численного моделирования (рис. 1.), совпадение оказывается достаточно хорошим.

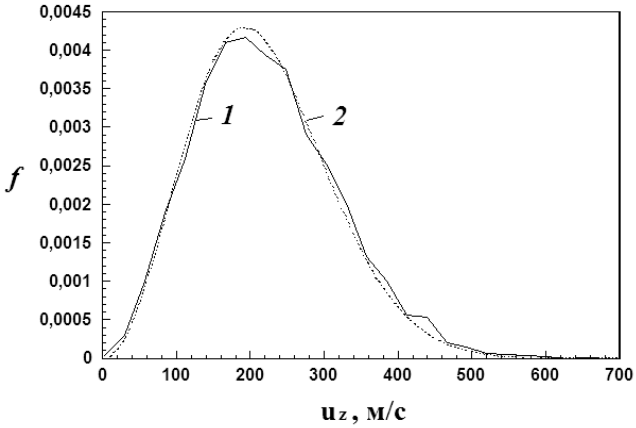


Рис. 1. *1* — ФР, полученная в результате численного моделирования; *2* — аналитически рассчитанная ФР

Отметим, что численные расчеты проводятся с использованием технологии параллельного программирования CUDA, что позволяет существенно увеличить количество моделируемых частиц.

Литература

1. **Лабунцов Д.А.** Анализ процессов испарения и конденсации // ТВТ. 1967. Т. 5. № 4. С. 647—654.

2. **Крюков А.П., Лабунцов Д.А.** Процессы интенсивного испарения // Теплоэнергетика. 1977. № 4. С. 8—11.

Секция 42

ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Председатель секции — д.т.н., профессор А.П. Крюков
Секретарь секции — к.т.н., доцент П.В. Королев

С.А. Архипов, студ.; рук. В.И. Могорычный, к.т.н., с.н.с.
(НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ МИКРОКРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ НА СМЕСЕВОМ ХЛАДАГЕНТЕ

В последние годы вырос интерес к дроссельным регенеративным системам (ДРС) в связи с применением многокомпонентных рабочих тел (МРТ). Это объясняется рядом причин.

ДРС в отличие от газовых машин имеют меньшую компактность, но это компенсируется их высокой долговечностью вследствие практически полного отсутствия движущихся деталей. При использовании в ДРС холодильных компрессоров с жидкой смазкой достигается очень высокая надежность. Еще одним плюсом ДРС является простота их конструкции. Следствием простоты конструкции ДРС является их сравнительно невысокая стоимость по сравнению с другими криогенными системами.

В данной работе представлено проектирование холодильной установки для охлаждения объектов малых размеров. Требования к установке включают мобильность, ресурсоемкость, сравнительную дешевизну, а также возможность перемещения небольшой охладительной части.

Для работы установки был выбран термодинамический цикл Джоуля—Томсона с МРТ[1]. Рабочее тело было выбрано таким образом, чтобы обеспечить достижение требуемого температурного уровня с достаточным значением холодопроизводительности.

Система делится на два мобильных блока: сжатия и охлаждения. Эти блоки соединены посредством гибких шлангов, что позволяет перемещать блок охлаждения без потерь холода на внешний теплоприток.

В работе представлены расчет цикла на выбранной смеси, различные варианты расчета выбранного ранее типа теплообменника (кожухотрубный без трубной решетки, свернутый в змеевик), расчет длины дросселя и оценка теплопритоков. Также были разработаны конструкции коллекторов теплообменника, проведен подбор оборудования и разработана конструкция корпуса компрессорного блока.

Литература

1. **Лунин А.И., Могорычный В.И., Коваленко В.Н.** Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике. М.: Издательство МЭИ, 2009.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ В ДЛИННЫХ КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

В криогенной и холодильной технике широкое применение получили установки, работающие на основе дроссельного цикла благодаря простоте конструкции, надежности эксплуатации и относительной дешевизне последнего как устройства. Одним из направлений повышения эффективности данных циклов является применение многокомпонентных рабочих тел (МРТ) [1]. Однако использование МРТ накладывает определенные требования на допустимые скорости потоков в каналах теплообменника. Потоки в теплообменнике непрерывно осуществляют фазовый переход, рабочее вещество находится в двухфазном состоянии. Поэтому при недостаточной скорости потока может произойти расслоение смеси, паровая фаза окажется наверху, а жидкая внизу, что приведет к нарушению фазового равновесия и, как следствие, ухудшению работы теплообменника, а также к несостоятельности применения гомогенной модели при его расчете. В данной работе проведена оценка режимов течения и параметров процесса кипения многокомпонентных смесей в длинных каналах различной геометрии с использованием моделей, предложенных различными авторами [2, 3]. Эти данные сравниваются с результатами, полученными при использовании гомогенной модели, и делается заключение о применимости последней для описания подобных процессов. Подбор состава смесей проводится на компьютере с применением соответствующего программного обеспечения. Для каждой смеси выполнена оценка режимов течения и параметров процесса кипения в каналах теплообменника в зависимости от массового расхода смеси.

Литература

1. **Лунин А.И., Могорычный В.И., Коваленко В.Н.** Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике. М.: Изд. дом МЭИ, 2009.

2. **Gregory Nelis, Cory Hughes, John Pfotenhauer.** Heat transfer coefficient measurements for mixed gas working fluids at cryogenic temperatures. USA: Science Direct, 2005.

3. **LixinCheng, Dieter Mewes.** Review of two-phase flow boiling of mixtures in small and mini channels. USA: Science Direct, 2005.

А.В. Зюзько, асп.; рук. В.И. Могорычный, к.т.н., с.н.с.
(НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЧАСТНОГО ЖИЛОГО ДОМА

В настоящее время наше общество все еще достаточно обеспечено запасами нефти, газа и каменного угля, чтобы использовать их в качестве источника энергии для обеспечения горячего водоснабжения и отопления сооружений в холодный период года. Но вышеперечисленные источники энергии относятся к невосполняемым и с каждым годом их запасы уменьшается. Это в свою очередь приводит, с одной стороны, к поиску альтернативных источников энергии и, с другой стороны, к удорожанию использования существующих. Помимо этого, в последние годы встал вопрос об уменьшении вредного воздействия на атмосферу Земли. Поэтому одним из альтернативных источников тепла для системы отопления может служить система, реализующая обратный цикл по принципу теплового насоса [1].

Источником энергии для теплового насоса является электрическая энергия, получение которой возможно с помощью АЭС, ГЭС, ветряных станций и солнечных батарей, т.е. для реализации теплового насоса возможно использование восполняемых источников энергии. При этом тепловые насосы, не использующие в качестве рабочего тела хлорфторуглеродистые хладагенты, не загрязняют окружающую среду.

В данной работе проведен расчет системы теплоснабжения для частного жилого дома. Проведено сравнение как с традиционным централизованным теплоснабжением, так и с децентрализованным теплоснабжением. Рассчитан период окупаемости теплового насоса. В качестве оборудования в расчете закладывались характеристики современного холодильного оборудования, используемого в существующих системах холодоснабжения.

Литература

1. **Энергетические** основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. М.: Энергоиздат,1981. — 320 с.: ил.

В.В. Саяпин, студ.; рук. Т.А. Алексеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ

Для исследований и анализа температурных полей электронных плат необходима программа, которая позволяла бы учитывать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, зависящей в свою очередь от координат [1, 2, 3]. В процессе разработки такой программы был сделан ряд допущений. В программе предусмотрена возможность выбора одного из двух способов охлаждения электронной платы: конвективным отводом теплоты при обдуве холодным воздухом (с интенсификацией теплообмена) и отводом тепла теплопроводностью по материалу платы со сбросом его в канал с охладителем.

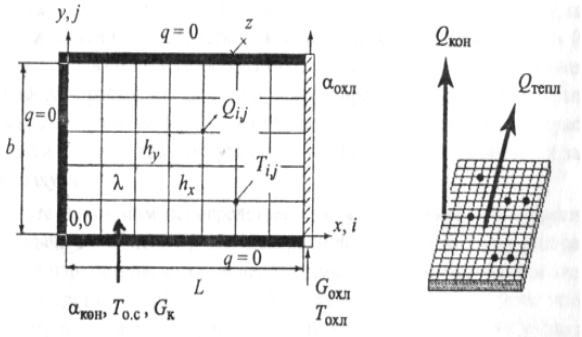


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи расчета:
b, L, z — ширина, длина и толщина платы; *y, x* — координаты точек платы; *i, j* — индексы номеров точек платы для соответствующих координат; $G_{охл}$, $T_{охл}$ — расход жидкого хладоносителя и его температура на входе в охлаждающий канал; $G_к$, $T_{ос}$ — расход воздуха и его температура на входе в канал воздушного охлаждения

Основной результат, выдаваемый программой, — это координаты точки с максимальной температурой и температурное поле всей пластины, которое представляется в виде двумерного массива. При выполнении расчета на экран выводится информация о том, с какой точностью выполняется баланс тепла. В программе предусмотрена возможность выбора шага для разбиения пластины.

Данная программа может использоваться для расчета теплового режима плат на начальной стадии проектирования, помогая сделать предварительные расчеты и избежать затрат времени на выбор и подбор оптимальных параметров систем охлаждения.

Литература

1. **Алексеев Т.А.** Информационное обеспечение для расчета систем охлаждения радиоэлектронного оборудования. М.: Изд. дом МЭИ, 2009.

2. **Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М.** Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968.

3. **Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.** Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990.

Д.С. Симушев, асп.; рук. А.Ф. Гиневский, к.т.н., с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО КАПИЛЛЯРНОГО РАСПАДА СТРУЙ ЖИДКОСТИ МАЛОЙ ВЯЗКОСТИ

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию процессов получения дисперсных частиц субмиллиметровых размеров с высокой степенью идентичности. Одним из наиболее перспективных методов получения таких частиц является метод вынужденного капиллярного распада струй жидкости (ВКРС) [1].

Использование численного моделирования для изучения процессов, лежащих в основе ВКРС, позволяет получить ряд интересных результатов. Эти результаты не очевидны при аналитическом исследовании проблемы и их сложно зафиксировать в эксперименте.

В рамках исследования рассматривалась задача о распаде струи жидкости круглого сечения под действием силы поверхностного натяжения в изотермических условиях. Был проведен анализ более 30 различных режимов распада, в которых варьировались как режимные параметры, так и сама рабочая жидкость.

Установлено, что при монодисперсном распаде результаты численного эксперимента имеют хорошее качественное и количественно соответствие с аналитическими решениями, а также неплохое качественное соответствие с экспериментальными данными. Это позволяет говорить о применимости используемого подхода к исследованию процесса ВКРС.

Была разработана методика обработки результатов численного эксперимента с целью получения интегральных характеристик распада. Анализ объема отрывающихся капель показал, что для большинства исследуемых случаев существует периодичность процесса распада даже в режимах, которые не являются монодисперсными. Проведено изучение поведения первых капель, зафиксированы различные механизмы их образования и эволюции.

Литература

1. **Аметистов Е.В.**, **Дмитриев А.С.** Монодисперсные системы и технологии. М.: Издательство МЭИ, 2002.

Д.А. Сысоев, асп.; рук. Т.А. Алексеев, к.т.н., доц., (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНИКА В ГАЗОВЫХ МИКРОКРИОГЕННЫХ МАШИНАХ

Использование газовых микрокриогенных машин Стирлинга для охлаждения матричных фотоприемных устройств, работающих в средне- и длинноволновой ИК области спектра излучения, объясняется их относительно высоким КПД в диапазоне рабочих температур таких приемников. Одним из недостатков в существующих системах является длительный период выхода на рабочую температуру и относительно высокая потребляемая мощность в стационарном режиме. В существующих системах в качестве теплообменника чаще всего используется бронзовый сетчатый регенератор. Несмотря на высокие технические и эксплуатационные характеристики, эффективность бронзового регенератора с понижением температуры уменьшается, что приводит к увеличению энергопотребления. Использование регенератора из редкоземельных металлов, выполненных в виде монодисперсных наношариков, значительно повышает эффективность термодинамического цикла криогенных систем, однако в микрокриогенных системах невозможно заполнение всей полости регенератора монодисперсными наношариками. Это связано со значительным повышением гидравлического сопротивления, что ведет за собой повышение потребляемой мощности. Анализ известных редкоземельных металлов показал, что каждому металлу соответствует некоторая оптимальная область температур, где его применение наиболее эффективно [1]. В области азотных температур наиболее целесообразно применять диспрозий. Для усовершенствования системы предлагается использовать комбинированный способ заполнения полости регенеративного теплообменника. В области высоких температур используется бронзовая сетка, а в области низких температур — монодисперсные наношарики из диспрозия. Такая компоновка позволяет уменьшить потери за счет недорекуперации в 1,8 раз, при этом коэффициент теплопередачи возрастет в 3 раза. Недостатком данной компоновки можно считать увеличение гидравлического сопротивления в 7 раз. Общий КПД криогенной машины возрастает на 10 %, при этом время выхода сокращается в 1,5 раза, а потребляемая мощность в стационарном режиме снижается на 7 %.

Литература

1. **Карагусов В.И., Карагусова Е.Е.** Оптимальные температурные диапазоны редкоземельных насадок регенераторов криоохладителей // Криогенное и холодильное оборудование и технологии: сб. науч. тр. Омск. 1997. В. № 1. Ч. № 1. С. 122—129.

А.Ш. Хуснуллин, студ.; рук. Т.А. Алексеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КРИОГЕННОЙ ГЕЛИЕВОЙ УСТАНОВКИ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ДРОССЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯ ПАРОЖИДКОСТНЫМ ДЕТАНДЕРОМ

В современной криогенной технике широко применяются расширительные машины — детандеры, предназначенные для понижения энтальпии (охлаждения) рабочего тела путем его расширения с отдачей внешней работы. Наибольшее распространение получили поршневые и турбинные детандеры. Применение турбинного детандера — турбодетандера (ТД) в криогенных установках связанно с определенными проблемами, в том числе с проблемой применения турбомашин при парожидкостном потоке. Создание надежных и эффективных парожидкостных ТД не только открывает широкие возможности для создания новых, более экономичных криогенных установок со сниженным удельным энергопотреблением и уменьшенной металлоемкостью теплообменной аппаратуры, но и позволяет осуществить относительно простую модернизацию различных действующих криогенных установок путем замены дроссельного вентиля соответствующим ТД, позволяющую добиться существенного увеличения их холодопроизводительности или производительности по выходу жидкого продукта [1, 2].

В данной работе проведены расчет и сравнение криогенных циклов при замене дросселя парожидкостным детандером на примере КГУ-500, газодинамический расчет детандера для замены дросселя в данной установке, сделано заключение о энергетической выгоде использования парожидкостных детандеров.

Литература

1. **Центростремительные** турбодетандеры / А.Б. Давыдов, Г.А. Пересторонин, В.Л. Стулов, А.Н. Шерстюк; под общей ред. В.Н. Удута. М.: Колос-Пресс, 2002.

2. **Повышение** эффективности и надежности криогенной гелиевой установки в результате совершенствования турбодетандерного агрегата / А.Б. Давыдов, А.Ш. Кобулашвили, Е.П. Крылов и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. 1979.

Секция 43

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Председатель секции — д.т.н., профессор А.С. Дмитриев
Секретарь секции — аспирант Д.В. Болтунов

Ю.О. Андреева, студ., Д.В. Болтунов, асп.;
рук. А.А. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ, ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Частотно селективные поверхности (далее ЧСП) являются эффективным решением проблемы электромагнитной совместимости РЭА. Применение в производстве ЧСП современных методов микрообработки и нанотехнологий обеспечивают более высокие скорости модуляции сигнала, широкий диапазон настройки, малые потери и низкое потребление энергии при меньших массе и габаритах.

Целью настоящей работы являлось определение облика технического решения, обеспечивающего реализацию энергоэффективных, радиационностойких ЧСП для применения в аэрокосмической отрасли и энергетике. Для достижения цели проведен комплексный обзор конструкций, принципов функционирования и методов изготовления ЧСП.

В работе рассмотрены управляемые ЧСП, в которых модуляция сигнала осуществляется за счет контролируемого внешнего воздействия: вид 1 — на подложку с переменными электрическими свойствами (феррит), вид 2 — на активные компоненты (диоды, ключи), выполненные на диэлектрической подложке с постоянными свойствами. По виду внешнего управляющего воздействия можно классифицировать магнитные, полупроводниковые, ферроэлектрические, оптические и механические ЧСП. По типу исполнения активных компонентов в подавляющем большинстве, но не всегда, в ЧСП применяются матричные системы, иногда — микроэлектромеханические (МЭМС). Среди методов изготовления ЧСП широкое распространение получили: технология газофазного эпитаксиального роста слоистых наноструктурированных покрытий (вид 1); технология монтажа и технология многоуровневой поверхностной микрообработки с применением жертвенных слоев (вид 2).

Каждый из рассмотренных видов ЧСП имеет свое особое место в технике, однако на основе заданных критериев оценки (диапазон

настройки, быстродействие, энергопотребление) выбран механический принцип функционирования ЧСП, который имеет несколько распространенных конструктивных исполнений: на параметрических диодах и микроэлектромеханических ключах (далее микрореле). Преимуществом микрореле является более высокая радиационная стойкость. Оптимальный метод изготовления (по себестоимости) — групповая технология поверхностной микрообработки. Оптимальное конструктивное исполнение — матричная МЭМС.

К.А. Богомолова, студ.; рук. А.С. Дмитриев, д.ф.-м.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВЫХ УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

В настоящее время исследования в области смачивания поверхности набирают обороты. Их актуальность объясняется потребностью в новых, более совершенных материалах и покрытиях.

Целью данной работы стало исследование краевых углов смачивания различных поверхностей: от гладких до шероховатых. Генерация, наблюдения и измерения времени испарения и кипения капель проводились при помощи разработанного и созданного измерительного комплекса на базе гониометра Easydrop компании Kruss. Специально для экспериментов были подготовлены подложки, на которых были сформированы мезоскопические структуры на основе микросфер [1]. Рабочие жидкости подбирались исходя из большой разницы в теплоте парообразования, а также по различию углов смачивания при комнатных температурах.

В ходе исследования наблюдалось некоторое уменьшение контактного угла с ростом температуры поверхностей, смоченных водой. В случае мезоструктур из микросфер, покрытых сажей, краевой угол выявлял сильные гидрофобные свойства. При нагреве подложек, смоченных этиловым спиртом, жидкость не могла удержаться на поверхности в форме капли и впитывалась. Окончательного объяснения полного впитывания в мезоструктуру в настоящее время нет. Единственное, что можно утверждать — с уменьшением пористости мезоструктуры при стремлении к плотной шероховатой поверхности впитывание прекращается, и контактный угол выходит на свое стандартное значение для гладких поверхностей. Аналогичные аномалии наблюдались ранее при кипении на мезоподложках [2].

Литература

1. **Аметистов Е.В., Дмитриев А.С.** Монодисперсные системы и технологии. М.: Издательство МЭИ, 2002. 392 с.

2. **Дмитриев А.С., Романов А.С.** Особенности тепломассообмена капель жидкостей при взаимодействии с перегретыми мезоструктурными и наноструктурированными поверхностями. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. С. 67—69.

Д.В. Болтунов, асп.; рук. А.А. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
конс-ты В.Н. Кисель, д.ф.-м.н. (ИТПЭ РАН, Москва),
А.С. Корпухин, к.т.н. (ООО «Микроника», Москва)

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПОЛИИМИДНОЙ ОСНОВЕ

Управляемые частотно-селективные поверхности (ЧСП) применяются для фильтрации радиосигналов. ЧСП, включающие в свой состав матричные микроэлектромеханические системы (далее МЭМС ЧСП) характеризуются малыми потерями и токами смещения, низкой стоимостью по сравнению с аналогами. В связи с этим исследование путей создания МЭМС ЧСП и их характеристик является актуальной задачей.

Целью работы являлось определение частотных зависимостей отражения, пропускания радиоизлучения от экспериментальных образцов.

Объектами исследования служили экспериментальные образцы ЧСП, изготовленные по технологии поверхностной микрообработки на полиимидной основе в виде матричной МЭМС, включающей 70 микрореле.

Частотные зависимости определяли в диапазоне 8—14 ГГц на измерительном стенде, включающем в свой состав векторный анализатор цепей СВЧ, геометрию образцов — методом атомно-силовой микроскопии.

Полученные образцы обладают следующими характеристиками: в режиме «включено»: уровень пропускания –8 дБ в диапазоне частот 11,0—12,5 ГГц, резонансная частота — 12 ГГц; в режиме «выключено»: уровень пропускания в обозначенном диапазоне частот составил менее –0,5 дБ.

Представленные результаты уступают ранее полученным данным [1] в части максимальных значений уровней отражения/пропускания сигнала, что, скорее всего, объясняется различием материалов подложек — более высоким тангенсом диэлектрических потерь полиимида. В то же время, замена подложки СВЧ-ламината на тонкопленочный полиимид в настоящей работе позволила повысить технологичность, что проявилось в количественном приросте элементов матричной МЭМС с 7 до 70.

Таким образом, результаты испытаний согласуются с данными [1] и свидетельствуют о возможности создания экранов с управляемой радиопрозрачностью на основе матричной МЭМС на полиимидной основе.

Литература

1. **Болтунов Д.В., Жуков А.А., Кисель В.Н.** Характеристики частотно-избирательных поверхностей на основе микрореле // Материалы 19-й конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т. 4. С. 62—63.

О.Ю. Головина, студ.; рук. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕНОГРАФЕНА ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИЕЙ

Графен (или графит толщиной в один атомный слой) привлекает пристальное внимание исследователей набором уникальных свойств [1]. В последнее время появились сообщения о получении так называемого трехмерного графена, или пенографена [2, 3]. Последнее название отражает технологию получения этого материала, поскольку в первой работе он был синтезирован в результате высокотемпературного разложения метана на поверхности пеноникеля [4]. Пенографен состоит из взаимосвязанных гибких графеновых сеток, что делает его материалом с высокой электропроводностью. В настоящей работе мы поставили своей целью исследовать графен на пеноникеле методами электронной спектроскопии — XPS и REELS.

Исследование приготовленных нами образцов проводилось с помощью модуля электронно-ионной спектроскопии на базе платформы НаноФаб 25 в НИУ «МЭИ».

На рис. 1 представлен обзорный спектр XPS исследуемого образца. Обращает на себя внимание практически полное отсутствие кислорода на поверхности образца. Малая интенсивность линий никеля означает, что толщина углеродного слоя d существенно больше толщины монослоя. Оценка толщины слоя из отношения интегральных интенсивностей [5] линий $C1siNi2p_{3/2}$ составила следующее значение: $d \approx 3{,}3$ нм. При анализе спектров REELS было показано, что исследуемый образец близок к графиту.

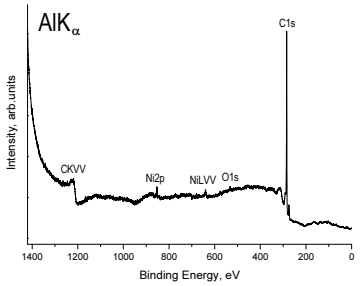


Рис. 1. Спектр XPS исследуемого образца

Литература

1. **Geim A.K. &Novoselov, K.S. //** Nature Mater. 6, (2007). P. 183—191.
2. **Zongping Chen, WencaiRen, LiboGao** et al. // Nature Mater. 10. P. (2011).
3. **X. Cao, Y. Shi, W. Shi** et al. // Small, 7, (2011). №. 22. P. 3163—3168
4. **M.T. Pettes, H. Ji, R.S. Ruoff**et al. // Nano Lett, 12, (2012). P. 2959—2964.
5. **Зандерн А.** Методы анализа поверхностей. М.: Мир, 1979.

К.В. Кубрак, студ.; рук. Н.И. Тимошенко, к. ф.-м. н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЧАСТИЦ КРЕМНИЯ И СЕРЕБРА И ОБЛАДАЮЩИХ СВОЙСТВАМИ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

Стоимость «солнечной» электроэнергии значительно превышает стоимость энергии, полученной на традиционных источниках. Чтобы массово внедрить солнечные преобразователи энергии, необходимо создать максимально эффективное использование солнечного излучения и значительно удешевить производство самих элементов.

Технологией будущего солнечной энергетики сегодня называют технологию тонкопленочных солнечных элементов (СЭ) на основе аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния [1, 2]. Кроме того, возможное решение проблемы повышения эффективности СЭ состоит в более полном использовании падающего излучения путем использования явления плазмонного резонанса.

Для получения наноразмерных кремневых покрытий был использован метод газоструйного осаждения, который является развитием метода термокаталитического химического осаждения из газовой фазы (Hot-Wire Chemical Vapor Deposition (HWCVD)). Исследования проводились с целью получения тонких пленок аморфного и кристаллического кремния с включениями наночастиц серебра и определения влияния различных параметров осаждения на структуру полученного кремниевого покрытия.

Полученные образцы исследовались на электронном микроскопе для определения структуры поверхности, по спектрам комбинационного рассеяния (раман-спектры) определялась доля аморфной и кристаллической фракции, элементный состав и примеси в пленке определялись по характеристическому излучению в электронном пучке.

Автором были проведены многочисленные опыты по осаждению нанокомпозитных пленок, также проанализированы результаты полученных опытных образцов.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предлагаемых методов для нанесения пленок с целью их использования на практике, в частности при изготовлении солнечных элементов.

Литература

1. **Thin-film silicon solar cells.** Editor: Arvind Shah. // EPFL Press, 2010. 430 p.

2. **Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А.** Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. — 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. — 168 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА COFFEE RING, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВЫСЫХАНИИ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ SiO_2 И Fe_2O_3

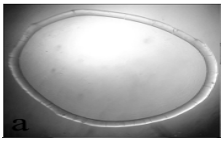
Эффектом coffee ring («кофейное кольцо») называют образование в результате действия капиллярных сил следа, оставляемого лужей жидкости с взвешенными в ней частицами после высыхания [1]. В быту наблюдается в частности для кофе и красного вина.

Во многих областях современной теплоэнергетики находят применение жидкости, в которых по тем или иным причинам (функционально или вследствие загрязнения) взвешены микрочастицы. В нанотехнологиях наноколлоидные растворы различных веществ являются одним из основных объектов исследований. Поэтому изучение факторов, влияющих на проявление эффекта coffee ring, является актуальной проблемой и требует проведения экспериментальных изысканий.

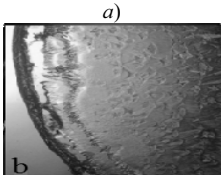
В данной работе описаны эксперименты по исследованию процесса высыхания капель наножидкостей SiO_2 и Fe_2O_3 согласно двум методикам, приведены микроснимки получаемых следов (рис.1). В рамках работы был проведен ряд опытов, направленных на определение условий, влияющих на возникновение характерных колец вплоть до полной отмены эффекта coffee-ring.

Образование следов, оставляемых каплями наножидкостей, в целом, похоже: вдоль окружностей изначальных капель формируются буртики, куда, соответствуя эффекту coffee ring, стягивается большая часть взвешенных частиц. Однако реакция жидкостей на различные по типу и степени воздействия оказалась разной.

В [2] описана реализация процесса самосборки, основанная на применении эффекта coffee ring для водных растворов различных материалов. В рамках выполнения представляемой работы также была предпринята попытка организовать самосборку для исследуемых наножидкостей.



а)



б)

Рис. 1. Следы, оставляемые наножидкостями: *а* — SiO_2; *б* — Fe_2O_3

Литература

1. **Capillary** flow as the cause of ring stains from dried liquid drops / R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont et al. // Nature. 1997. 389(6653).

2. **Coffee-Ring** Effect-Based Three Dimensional Patterning of Micro/Nanoparticle Assembly with a Single Droplet / Sun Choi, Stefano Stassi, Albert P. Pisano, Tarek I. Zohdi // Langmuir. 2010. 26(14).

И.А. Тараканов, асп.; рук. Ю.А. Волков, к.м.-ф.н.,
(ИПМ им. Келдыша, Москва)

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ В МИКРОСХЕМАХ

Создание адекватной математической модели имеет чрезвычайно важное значение для описания процессов в современных электронных микросхемах под воздействием радиационного излучения, в том числе и высокоэнергичных гамма-квантов.

В данной работе были вычислены времена релаксации для решения задачи радиационной проводимости в полупроводниках и диэлектриках. Данная задача решается методом частиц [1].

В проведенном расчете не используется параболическое приближение плотности состояний $g(e)$, в отличии от ряда других работ [2], так как реальная $g(e)$ далека от параболической в зоне, интересующей с точки зрения радиационной проводимости (высокие энергии электронов). Также принимается, что эффективная масса $m^*(e)$ электрона зависит от энергии. В этой работе предложены несколько методов определения $g(e)$ и $m^*(e)$ для Si и SiO_2: формула Кейна для $m^*(e)$, $g(e)$, рассчитанная по теории функционала плотности (DFT) [3], и $m^*(e)$ и $g(e)$, рассчитанные по групповой скорости.

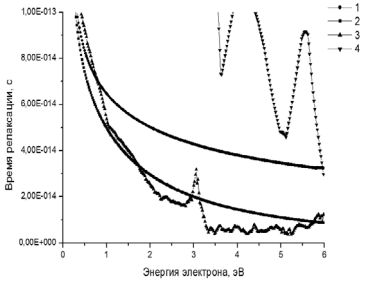


Рис. 1. 1 — параболическое; 2 — формула Кейна; 3 — DFT; 4 — по групповой скорости

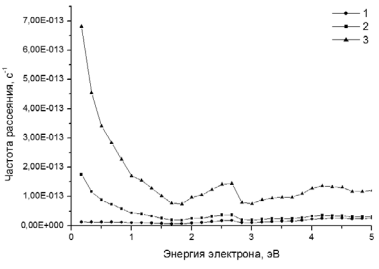


Рис. 2. 1 — LO; 2 — LA; 3 — TO

На рис. 1 показаны суммарные времена релаксации в SiO_2 для параболического $g(e)$, для формулы Кейна, для расчета по методу DFT и для $g(e)$, вычисленной по групповой скорости. На рис. 2 показаны времена релаксации в Si отдельно для всех типов фононов.

Литература

1. **Хокни Р**. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.

2. **M.V. Fishetti** Theory of high-field electron transport in silicon dioxide // Physical Review B. 1985. Vol. 31. No 12.

3. **Gnani E.** Density of states and group velocity of electrons in SiO_2 calculated from a full band structure// Physical Review B. 2002. Vol. 66. 195205.

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

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ИСПАРЕНИЕМ

Испарение жидкостей в системах монодисперсных микросфер представляет важную проблему [1], исследованную в данной работе экспериментально. Была спроектирована и создана установка и проведены исследования двух типов: испарение воды, спирта и изооктана со свободной поверхности без микросфер из пробирок, испарение указанных жидкостей в присутствии монодисперсных микросфер.

Все эксперименты проводились при температурах от 60 до 80 °С. Целью работы являлось исследование зависимости скорости испарения от температуры.

Экспериментальные образцы отличались диаметрами микросфер (d = 100, 200 и 300 мкм) для изучения эффекта их влияния на процесс испарения. Все эксперименты проводили (кроме пробирок) еще и в чашках Петри, чтобы иметь различные верификации экспериментов. Помимо этого, развиты модели испарения и проведено сравнение как с нашими результатами, так и с результатами других исследователей.

Показано, что в мезоструктурах картина испарения отличается от аналогичной в пористых средах или со свободной поверхности [2]. Испарение в случае мезоструктур в значительной степени связано с влиянием поверхности микросфер, возникновением «мостиков» между жидкостью и микросферами в процессе испарения и другими эффектами.

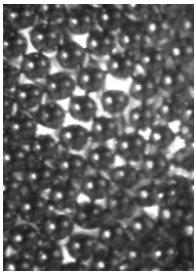


Рис. 1. Микросферы в воде

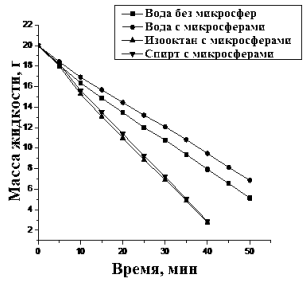


Рис. 2. Зависимость массы жидкостей от времени

Литература

1. **Аметистов Е.В., Дмитриев А.С.** Монодисперсные системы и технологии. М.: Изд-во МЭИ, 2002. — 536 с.

2. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.

Направление

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —

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

Секция 44

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Председатель секции — д.т.н., профессор В.Б. Тупов
Секретарь секции — к.т.н., доцент С.А. Семин

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

СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Использование топливных гранул в качестве топлива — хорошая альтернатива прямому сжиганию неподготовленного топлива (фрезерного торфа, древесных отходов, лигнина и т.п.) в топках котлов, поскольку гранулы имеют ряд преимуществ при их транспортировке, складировании и сжигании. Для повышения эффективности сжигания, а также для оптимизации процесса формирования топливных гранул к исходному сырью могут быть добавлены связующие вещества.

Техногенные отходы, в частности изношенные автопокрышки, являются ценным сырьем в качестве составляющих топливных гранул, поскольку составные вещества автопокрышек способствуют улучшению физико-химических и топливных свойств получаемых гранул. Использование изношенных автопокрышек целесообразно и в экологическом аспекте — для обеспечения чистоты окружающей среды. В мире перерабатывается около 20 % изношенных автопокрышек, а остальная часть накапливается и является источником длительного загрязнения окружающей среды.

Анализируя состав резинового порошка, полученного при выполнении данной работы, с использованием электронно-ионных технологий, можно отметить, что резиновый порошок имеет высокие топливные показатели по теплоте сгорания, а также малые зольность и сернистость. Данный факт вопреки широко распространенному мнению о сильном загрязнении окружающей среды при сжигании бывших в употреблении автомобильных покрышек позволяет выдвинуть предположение о соблюдении нормативов по выбросам вредных веществ при использовании топливных гранул на основе торфа и резины бывших в употреблении автопокрышек [1].

Работа выполнена в рамках исполнения Государственного контракта №П1076 «Разработка технологии приготовления топливных гранул из

торфа и вторичного сырья, полученного в результате переработки бывших в употреблении автопокрышек (шифр НК-629П) от 31 мая 2009 г. по направлению «Переработка и утилизация техногенных образований и отходов».

Литература

1. **Технология** приготовления топливных гранул из смеси торфа и вторичного сырья / В.И. Кормилицын, Г.С. Догадин, С.И. Хренов и др. // Вестник МЭИ. 2012. № 5. С. 9—14

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

ПЕРЕВОД ЧАСТИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ИЗ ГАЗОХОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА В ГАЗОХОД ПВК

Высокое аэродинамическое сопротивление газового тракта котлов ТГМП-314 ст. №№ 5…8 ТЭЦ-23 «Мосэнерго» не позволяло в летнее время нести полную паровую нагрузку ($D_{ном}$= 980 т/ч). Как показали испытания, проведенные МЭИ в 2010 году, котлы в летнее время могли нести нагрузку не более 900 т/ч. В зимнее время с увеличением самотяги газового тракта котлы могли нести нагрузку, близкую к номинальной.

Для снижения аэродинамического сопротивления газового тракта было предложено перевести часть дымовых газов из газохода энергетического котла в газоход пиковых водогрейных котлов. Для выбора оптимальной геометрии узла использовался сертифицированный пакет прикладных программ «FlowVision» [1, 2] позволяющий численно моделировать процесс течения газов.

Дымовые газы из котла направляются в дымовую трубу по двум ниткам газоходов прямоугольной формы (нитки А и Б). В соответствии с рекомендациями МЭИ летом 2011 г. был организован переброс части дымовых газов (25 % объемного расхода дымовых газов котла) из газохода нитки Б котла ст. № 5 в газоход пиковых водогрейных котлов. Расчеты показали, что при переводе 25 % объемного расхода дымовых газов энергетического котла ТГМП-314 в газоход котла ПТВМ-180 водогрейный котел сможет нести номинальную нагрузку. Данная реконструкция позволяет снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта как нитки А, так и нитки Б на 30 кгс/м^2 за счет снижения аэродинамических потерь с выходной скоростью и потерь на трение в газоотводящем стволе дымовой трубы. Несмотря на то, что переброс газов происходит только из нитки В котла, аэродинамическое сопротивление ниток А и Б снижается практически одинаково, и перекоса по ниткам не создается.

После организации перевода части дымовых газов котел смог взять паровую нагрузку 972 т/ч, что близко к номинальной (980 т/ч). При проведении испытаний температура наружного воздуха составляла 20 ^{o}C.

Литература

1. **Сертификация** системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision / А.А. Аксенов, В.В. Шмелев, М.Л. Смирнова и др. // САПР и графика. 2006. № 4. С. 2—7.

2. **Аксенов А.А., Гудзовский А.В.** Пакет прикладных программ Flow Vision. М.: МФТИ, 1998. С. 45—56. (Сер. «Аэрофизика и прикладная математика»)

И.А. Жолбарысов, студ.; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЕРИОДА ОТОПИТЕЛЬНОГО СЕЗОНА

Снабжение тепловой энергией в Казахстане осуществляется с использованием всех известных типов источников [1]. Наибольшая опасность загрязнения атмосферного воздуха связана с процессами сжигания топлива на ТЭС и в котельных, так как выбрасывается значительное количество твердых частиц и газообразных веществ. Поэтому защита атмосферного воздуха от вредного воздействия энергетики — актуальная проблема в современных условиях [2].

Для определения содержания NO_2, CO использовали электронный газоанализатор с автономным питанием КМ-9006 (Quintox).

В исследованиях рассматривался период 15 октября — 15 апреля для котельных, работающих на угле разреза Каражыра (слоевой и пылевидный способы сжигания). По окончанию этого периода вместе с прекращением подачи тепловой энергии прекращается горячее водоснабжение. Результаты экспериментов были обработаны на ПЭВМ с помощью Excel.

Сравнительный анализ показал, что с наименьшим отклонением изучаемые показатели описываются полиномиальной функцией. Из полученных аналитических зависимостей видно, что наибольшие выбросы NO_2 и CO приходятся на середину отопительного периода, независимо от способа сжигания, что вызвано наибольшей нагрузкой на оборудование вследствие особенности климата и эксплуатации котельного оборудования г. Семей.

Предложения по дальнейшим исследованиям — сравнить вредное воздействие при сжигании других марок угля, выбрать оптимальный способ сжигания топлива и изучить концентрацию выбросов при аварийных остановах и новых запусках котлов.

Литература

1. **Программа** развития ООН в Казахстане. Институт энергетических исследований. Казахстан: Энергетическая безопасность, энергетическая независимость и устойчивость развития энергетики. Состояние и перспективы. Аналитическое исследование. Астана, 2009. — 374 с.

2. **Закиров И.А.** Разработка теоретических основ и комплексное внедрение природоохранных технологий на ТЭС: дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2005. — 462 с.

В.О. Киндра, А.А. Ухлин, В.В. Зеленов, студенты;
рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ г. МОСКВЫ С 1990 ПО 2010 ГОДЫ

Проблема загрязнения атмосферного воздуха становится особенно актуальной в наши дни. Доля выбросов энергетических предприятий среди стационарных источников загрязнения (по показателю суммарного массового выброса) составляет 65,6 %. Для оценки вклада каждого объекта теплоэнергетики был проведен мониторинг их энергетических и экологических показателей, а также составлена база данных. В нее вошли ТЭЦ ОАО «Мосэнерго», ОАО «МОЭК» и ведомственные котельные.

Поскольку основным видом энергетических топлив в регионе является природный газ, основным компонентом вредных выбросов энергетических предприятий являются оксиды азота. Анализ полученных данных показал, что в период с 1990 по 2010 годы суммарный выброс вредных веществ от энергетических предприятий снизился более чем в три раза (рис. 1). Выбросы золы снизились в 30 раз, оксидов серы — в 7 раз, а оксидов азота — в 3 раза. Это снижение обеспечено за счет увеличения в топливном балансе доли природного газа (доля которого за рассматриваемые 20 лет увеличилась с 92,2 до 98,7 %) при одновременном снижении долей угля и мазута, а также внедрения ряда мероприятий по подавлению оксидов азота. Для города Москвы сделан прогноз по выбросам вредных веществ основных теплоэнергетических объектов до 2030 года.

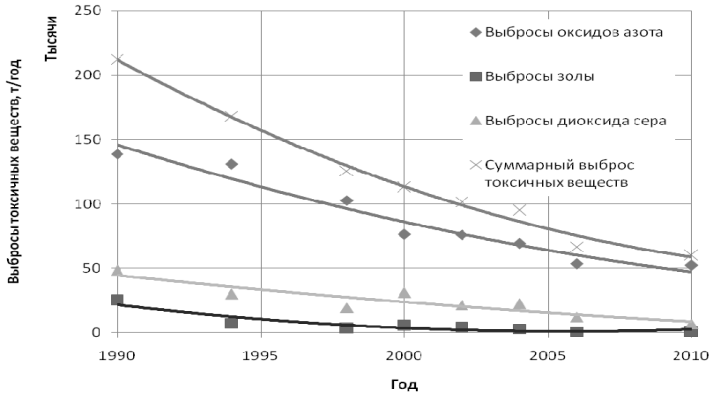


Рис. 1. Выбросы вредных веществ по группам предприятий теплоэнергетики г. Москвы за 1990—2010 гг.

Е.С. Малков, асп.; рук. Б.Л. Шелыгин, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СЖИГАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

При горении топлива в потоке газов, забалластированных продуктами сгорания и обедненных кислородом, снижаются полнота сгорания и скорость распространения пламени [1]. Поэтому для анализа изменения значения КПД КУ при сжигании дополнительного топлива необходимо оценить величину потери теплоты от химической неполноты сгорания q_3.

Решение поставленной задачи осуществлялось с помощью программного продукта Flow Vision, который в настоящее время широко используется для научно-исследовательских работ и решения прикладных задач газовой динамики.

При моделировании решаются полные уравнения Навье—Стокса, уравнение энергии, записанное через полную энтальпию, и уравнения турбулентных переменных. Расчет проведен на основе математической модели Аррениуса—Магнуссена.

На основании результатов расчетов разработана номограмма изменения величины q_3 в зависимости от количества сжигаемого топлива и параметров потока газов ГТУ: его температуры и объемной концентрации кислорода на входе в КСДТ (рис. 1). В правой части выделена область параметров работы ГТЭ-110 в диапазоне относительных нагрузок $n_{ГТУ}$ = 0,3÷1,0 и температур наружного воздуха $t_{НВ}$ = –30÷30 °С, в левой части — диапазон расходов топлива в КСДТ для выработки тепловой мощности 34,2 МВт.

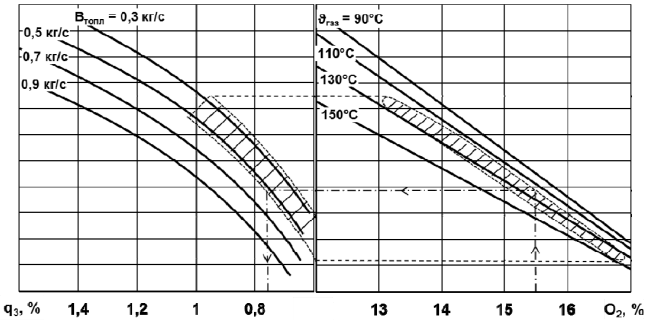


Рис. 1. Зависимость величины потери тепла с химической неполнотой сгорания q_3 от количества сжигаемого топлива, температуры газов и объемной концентрации кислорода на входе в КСДТ

Литература

1. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2002.

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

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТЭС

На ТЭС, как и на других промышленных предприятиях, выполняются акустические измерения. Особенностью акустических измерений на ТЭС является то, что там имеется большое количество самых разнообразных источников шума, а именно: ГТУ, котлы, турбины, насосы, тягодутьевые машины, ГРП, трансформаторы, градирни и др.[1]. Часть этих источников находится внутри помещений, а часть — на открытом воздухе. В зависимости от целей измерений условия измерений регламентируются следующими нормативными документами: ГОСТ 31295.2—2005 (ИСО 9613-2:1996), СТО 70238424.13.140.001—2008 для определения шума внутри помещений, СТО 70238424.13.140.001—2008 для измерений на открытом воздухе и др. Основными изменениями в регламентирующих документах за последние годы являются, с одной стороны, все большая детализация условий измерений для различных условий, а с другой — гармонизация с такими международными нормативными документами, как ИСО.

Чаще всего измеряются уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 31,5 до 8000 Гц, для тональных источников измерения проводятся в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 31,5 до 12 500 Гц. Измеряются уровни звука, дБА, для непостоянных источников — эквивалентные уровни звука.

Нормативные документы предписывают требования к приборам, измеряющим уровни шума. Измерения выполняются специальными приборами — шумомерами. В нашей стране получили распространение шумомеры, отвечающие требованиям нормативным документам таких производителей, как «Брюль и Къер» (Дания), «Свантек» (Польша), «Синус» (Германия), «Октава+» (Россия). В настоящее время произошли значительные изменения по улучшению качества выпускаемой аппаратуры для измерения шума, которые позволили увеличить точность и число одновременно анализируемых параметров, появилась возможность сохранения полученной информации и других важных качеств, при существенном сокращении их габаритных размеров и веса. Информация от прибора может поступать к компьютеру по сети Интернет.

Литература

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

А.С. Смоляков, Н.А. Федорова, студенты; рук-ли В.И. Кормилицын, д.т.н., проф., С.В. Щербинин, с.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ВОДОУГОЛЬНАЯ СУСПЕНЗИЯ — ПУТЬ К ПОВЫШЕНИЮ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

Сокращение доли газа в топливном балансе котельных и электростанций является приоритетной задачей. Одним из путей ее решения является переход с газа на уголь. Но при этом возникают две фундаментальные проблемы: 1) требуются инвестиции на реконструкцию топливных хозяйств и котельных установок; 2) соблюдение экологических нормативов.

В значительной степени эти проблемы решаются при использовании в качестве альтернативы углю топлива в виде водоугольной суспензии (ВУС), представляющего собой композиционное горючее с тонкодисперсной системой коллоидного типа, созданной на основе угля, воды и специальных добавок, придающих новому горючему заранее заданные свойства.

По физико-механическим и теплотехническим характеристикам ВУС приближена к жидкому топливу, поэтому процессы ее транспортировки, хранения, топливоподачи и сжигания тоже аналогичны. Использование угля в виде ВУС позволяет сократить потери угля при его транспорте, хранении и сжигании, благодаря чему улучшается экологическая обстановка в районах его использования. Это топливо взрыво- и пожаробезопасно.

Описаны методические основы, экспериментальная установка и опытные данные по технологии приготовления ВУС на базе ультразвуковых воздействий на различные количественные соотношения исходных компонентов водоугольных суспензий. Особое внимание уделено на процессы деминерализации, направленные на снижение зольности до 0,5—1,5 %, что в этом случае обеспечивает сжигание ВУС вместо природного газа и мазута в котлах, не оборудованных системами золоудаления, а также целесообразное использование полезных элементов из золы.

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

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ИСТОЧНИКА ШУМА С ПОМОЩЬЮ ЭКРАНА

Для изучения шумовых характеристик источников и проведения акустических расчетов необходимо знать акустический центр источников шума.

Предлагается методика определения акустического центра источника шума с помощью экрана. Затухание шума на экране зависит от расстояний от экрана до источника и приемника шума, а также от соотношения высот экрана и источника (рис. 1). Методика определения акустического центра основана на том, что при изменении высоты источника шума от выбранной точки h_s до высоты экрана h_e , затухание в точке R изменяется на достаточно большую величину, которая может быть зафиксирована шумомером. По [1] строится кривая изменения уровня шума на приемнике от высоты источника шума. По этой кривой определяется высота, при которой измеренный уровень шума в расчетной точке совпадал бы с расчетным. Найденная высота является акустическим центром источника шума. В соответствии с [1] максимальное затухание шума на тонком экране для любой из октавных полос не должно превышать 20 дБ, что определяет ограничения применения предложенного метода. По предлагаемой методике можно определить высоту экрана, при которой для всех октавных полос будет наблюдаться изменение уровня звукового давления в расчетной точке при изменении высоты источника. С этой целью строятся кривые, показывающие максимальное изменение эффективности экрана, которое возможно при изменении h_S от 0 до h_e в зависимости от высоты экрана. Также ограничение заключается в том, что высота источника шума может быть определена только в том случае, если изменение высоты вызовет изменение уровня шума в точке R более суммарной погрешности измерения и расчета.

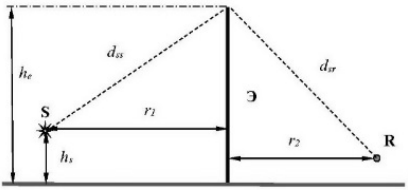


Рис. 1. Распространение шума через экран:
Э — экран; S — источник шума; R — приемник шума; r_1 — расстояние от источника до экрана; r_2 — расстояние от экрана до приемника; d_{ss} — расстояние от источника до дифракционной кромки; d_{rr} — расстояние от дифракционной кромки до приемника; h_S — высота источника шума; h_e — высота экрана

Литература

1. **ГОСТ 31295.2—2005** (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. М.: Стандартинформ, 2006.

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ГОРЕЛОК ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

На кафедре ТЭС СамГТУ ведутся исследования по разработке конструкций горелок для сжигания жидкого топлива в теплогенегирующих установках. В работе [1] представлена горелка с механическим распыливанием жидкого топлива, в которой используется струйно-стабилизаторный метод смесеобразования. Особенностью горелки является то, что подача жидкого топлива в камеру сгорания осуществляется через несколько топливных форсунок, равномерно расположенных на сферической стенке специальной топливной камеры. В камере стабилизируется давление и повышается температура топлива за счет излучения факела, что снижает энергозатраты на подогрев топлива и повышает качество его распыливания. Кроме того, в горелке осуществляется рециркуляция части жидкого топлива, находящегося в топливной камере, посредством установки на трубопроводе подачи топлива перед камерой выполненного в форме сопла Лаваля сужающего устройства и рециркуляционного трубопровода. Рециркулируемое через топливную камеру жидкое топливо подогревается в ней большее время, что приводит к подогреву топлива до более высокой температуры и обеспечивает более качественное его распыливание, т.е. получение совершенной топливовоздушной смеси на всех нагрузках работы горелки.

В [2, 3] представлена горелка для сжигания жидкого топлива, в которой также используется струйно-стабилизаторный метод смесеобразования. Однако перед конфузорно-диффузорным насадком установлен с возможностью продольного перемещения полый цилиндр, внутри которого на входе потока дутьевого воздуха расположен аксиальный лопаточный завихритель. В завихрителе осуществляется закрутка воздушного потока, который затем формируется в полом цилиндре перед подачей в конфузорно-диффузорный насадок. В сформированный закрученный воздушный поток интенсивнее вовлекается распыленное топливо, что обеспечивает более полное его перемешивание с воздухом в пределах горелки.

Литература

1. **Патент № 2345279 (РФ)**. Горелочное устройство / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Б.И. 2009. № 3.

2. **Патент № 2182283 (РФ)**. Способ получения качественной топливовоздушной смеси в горелочном устройстве / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Б.И. 2002. № 13.

3. **Патент № 2182284 (РФ)**. Горелочное устройство / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Б.И. 2002. № 13.

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

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУМОГЛУШИТЕЛЕЙ ГАЗОВЫХ ТРАКТОВ ТЭС

На ТЭС для снижения шума газовых трактов широко используются диссипативные глушители, для определения акустической эффективности которых известно нескольких способов. Проведен анализ применимости различных способов для определения эффективности диссипативных шумоглушителей газового тракта ТЭС, а также новые возможности от использования высокотемпературных микрофонов.

Измерение эффективности шумоглушителя в контрольной точке по изменению уровня звукового давления (УЗД) до и после установки шумоглушителя имеет ряд недостатков. Основным недостатком этого метода является влияние фонового шума, который не позволяет получить точное значение. Измерения непосредственно в газоходе с использованием образцового источника шума в отсутствие потока позволяют этого недостатка избежать. Но здесь требуются вводить корректирующую температурную поправку и поправку на отсутствие потока. Для измерения в каналах с потоком используются специальные насадки, которые предварительно тарируются, так как сам микрофон может быть дополнительным источником шумообразования. До последнего времени наибольшие трудности возникали при измерениях в высокотемпературных потоках, когда обычные микрофоны позволяли измерять при температурах не более пятидесяти градусов. Новые возможности открываются при использовании специальных измерительных микрофонов фирмы G.R.A.S. (Дания), которые позволяют проводить измерения в потоке с температурой до 800 °С. Измерительная трубка этого микрофона не приводит к дополнительным погрешностям из-за шума потока. Проведенное сравнение показывает, что при использовании измерительных микрофонов фирмы G.R.A.S существенно повышается точность измерений [1] по сравнению с другими рассмотренными выше способами.

Приведен опыт использования микрофона фирмы G.R.A.S (Type 40SA) при определении акустической эффективности шумоглушителя установленного в газовом тракте ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго».

Литература

1. **Вентцель Е.С**. Теория вероятности. М.: Наука, 1969. — 576 с.

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

АНАЛИЗ РАБОТЫ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ ПРИ ГЛУБОКОМ ОХЛАЖДЕНИИ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Обследование дымовых труб ТЭС показало, что основные разрушения строительных конструкций происходят из-за нарушения режимов их эксплуатации. Особенно важна защита труб от гидратной коррозии при установке за котлами конденсационных теплоутилизаторов (КТ). Для предупреждения конденсации остаточных водяных паров в газоходах и в дымовой трубе на практике применяют байпасирование горячих газов. При этом должно выполняться условие, что температура внутренней поверхности газохода и газоотводящей трубы должна быть выше точки росы.

Для определения основных условий надежной работы газоотводящих труб котлов, снабженных КТ, был проанализирован процесс теплообмена движущихся в трубе продуктов сгорания для случая ее защиты от гидратной коррозии методом байпасирования части горячих газов [1]. Получены формулы, позволяющие рассчитывать поля температур продуктов сгорания, внутренней поверхности стенки трубы и точки росы в зависимости от доли байпасируемых газов.

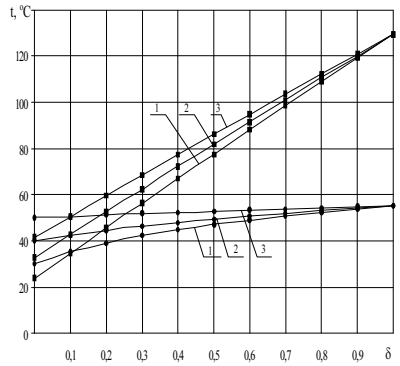


Рис. 1. Зависимость $t_р$ и $t_{ст}^{ог}$ от δ при υ_0 = 10 м/с, $t'_{ух}$ =150 °С и $t_н$= –30 °С:
1 — $t''_{ух}$ = 30 °С; *2* — $t''_{ух}$ = 40 °С; *3* — $t''_{ух}$ = 50 °С; ■ ■ ■ — стенка трубы, $H_{тр}$ = = 150 м; ●●● — точка росы

Выполнены расчеты для железобетонной дымовой трубы высотой 150 м. Результаты расчетов по определению температурных полей на внутренней поверхности в оголовке трубы представлены на рис. 1. Анализ результатов расчетов показывает, что доля байпасируемых газов в основном определяется теплозащитными свойствами конструкций труб и скоростью движения в них продуктов сгорания. Для железобетонных труб количество байпасируемых газов составляет 20——25 % общего их количества.

Литература

1. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ КОТЛОВ

Горение топлива в современных котлах является набором сложных физических процессов. Рациональная организации горения может позволить повысить экономичность и надежность работы котельных агрегатов, а также снизить выбросы вредных веществ в атмосферу [1]. Зачастую прямые методы исследования не позволяют получить полную качественную картину происходящих процессов в топочных камерах котлов.

В настоящий момент компьютерные мощности достигли уровня, достаточного для решения поставленных задач в программах вычислительной гидродинамики.

Базой программ численного моделирования являются уравнения гидрогазодинамики потоков:

1) уравнение неразрывности;
2) уравнение сохранения импульса;
3) уравнение сохранения энергии;
4) уравнение состояния.

В зависимости от поставленной задачи вышеперечисленные уравнения могут быть дополнены уравнениями различных моделей турбулентности, переноса веществ, химических реакций и др., подробное описание которых представлено в [2, 3].

В настоящий момент на кафедре КУиЭЭ проводится работа по численному моделированию процессов горения в топках котлов с применением программного комплекса «ANSYS CFX», включающего в себя широкий набор моделей турбулентности, горения и теплопередачи. В результате благодаря возможностям визуализации CFX планируется получить поля распределения температур в интересующих сечениях топочной камеры, линий тока в топочном объеме, провести оптимизацию аэродинамики топки и процесса горения.

В заключение будет проведена верификация полученных результатов исследования путем их сравнения с данными, полученными при исследованиях на физических моделях и при промышленных испытаниях.

Литература

1. **Современные** природоохранные технологии в электроэнергетике / под общей ред. В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

2. **Применение** пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова и др. М.: МФТИ, 2005.

3. **Chung T.J.** Computational fluid dynamics. Cambridge university press. 2002.

Н.Б. Юшков, соиск.; рук. В.И. Кормилицын, д.т.н., зав. лаб. (НЦ НВМТ РАН), проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРОТОЧНОГО ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛОСКОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ (ЛУНОК)

Обтекание поверхностных вихрегенераторов в виде лунок различной формы приводит к увеличению теплоотдачи от поверхности к потоку среды до 2,5 раз за счет существенного повышения турбулентности пограничного слоя и потока в целом [1]. При этом сопротивление канала практически не изменяется. Экспериментально исследовано увеличение интенсивности кавитации при обтекании потоком жидкости цилиндра с целью повышения качества эмульсии и усовершенствования конструкции проточного волнового генератора [2].

Экспериментальные исследования включали определение изменений интенсивности уноса материала с контрольной вставки и качества получаемой водомасляной эмульсии при использовании канала с предвключенным участком поверхностных вихрегенераторов.

Экспериментально установлено:

- увеличение интенсивности уноса материала с контрольной вставки на ≈15—20 % при наличии поверхностных вихрегенераторов;
- наличие режима интенсивного схлопывания кавитационных пузырьков, приводящего к дополнительному дроблению капель эмульсий;
- изменение дисперсных характеристик эмульсии путем нанесения лунок на поверхность рабочего канала совместно с побудителями кавитации (тела обтекания). Эксперименты показали, что содержание капель размером до 3 мкм составило около 90 % общего количества капель для масла И-50А, тогда как для исходного варианта волнового генератора — 78 %.

Литература

1. **Исаев С.А. Леонтьев А.И.** Интенсификация теплообмена поверхностными вихрегенераторами (лунками). Состояние и перспективы. // Труды Четвертой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». М.: МЭИ, 2011.

2. **Шмырков О.В., Юшков Н.Б., Кормилицын В.И.** Исследования характеристик плоского волнового генератора проточного типа с различными телами обтекания. М.: Инженерный журнал. Справочник. 2013. № 2. С. 12—19.

Секция 45

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЭС И АЭС

Председатель секции — к.т.н., доцент А.Е. Верховский
Секретарь секции — к.т.н., доцент П.М. Готовцев

И.В. Бирюлева, студ.; рук. П.М. Готовцев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МИНИМИЗАЦИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ПУТЕМ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД

Быстрый рост потребления воды, вызванный высокими темпами экономического развития и повышением жизненного уровня, приводит к обострению проблемы водоснабжения. В этой связи возникла необходимость проведения мероприятий, направленных на экономное и рациональное использование имеющихся водных ресурсов, включая и изыскание дополнительных источников водоснабжения. В качестве одного из них все большее распространение получает повторное использование очищенных сточных вод.

Следует отметить ливневые и талые сточные воды. Зачастую эти воды бесконтрольно через дренажные системы сливаются в близлежащие водоемы.

Разработка схем минимизации водопотребления путем повторного использования ливневых сточных вод в промышленности позволит минимизировать водопотребление более чем на 5 % [1]. Таким образом, при восполнении потерь оборотной воды за счет сбора снега в зимний период, в первую очередь, позволит снизить водопотребление ТЭЦ. Также снизится нагрузка на ливневую канализацию, так как стоки со снегоплавилен будут направлены на очистку и дальнейшее использование в СОО.

Ливневые сточные воды, используемые для подпитки системы оборотного охлаждения (СОО) должны проходить очистку, чтобы соответствовать требованиям к качеству добавочной воды (табл. 1) [2].

Таблица 1

Показатель качества воды	Добавочная вода систем охлаждения
Запах, баллы	< 3
Жесткость общая, мг-экв/л	1—2
Щелочность, мг-экв/л	0,5—1,0
Общее солесодержание, мг/л	150—250
Окисляемость перманганатная, мг O_2/л	1—5
РН	6,5—8,5

Литература

1. **Готовцев П.М.** Статья «Коммунальные системы водоснабжения».
2. **Пономаренко В.С.** Градирни промышленных и энергетических предприятий.

О.А. Брагинская, студ.; рук. П.М. Готовцев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПАРОВОДЯНОМ ТРАКТЕ ПГУ

Математические модели нацелены, в первую очередь, на оценку состояния ВХР, для того чтобы дать возможность оператору СХТМ понять, какие процессы происходят в пароводяном тракте и к чему они могут привести [1].

Точечно-пространственная математическая модель поведения примесей в пароводяном тракте позволяет:

1) оценивать с некоторой погрешностью текущие значения концентраций примесей;

2) прогнозировать изменения концентраций примесей во времени при различных условиях;

3) проводить различные инженерные расчеты;

4) использовать метод эффективных констант, т.е. может применяться для реального оборудования.

На рис. 1 представлено ожидаемое изменение концентрации примеси в паре во времени, вызванное ступенчатым изменением ее содержания в питательной воде [2].

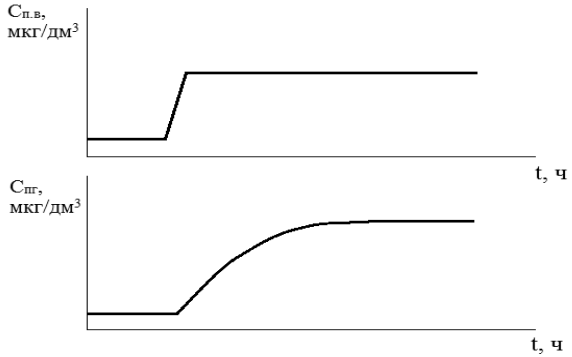


Рис. 1. Ожидаемое изменение концентрации примеси в котловой воде во времени, вызванное ступенчатым изменением ее содержания в питательной воде

Литература

1. **Некоторые** вопросы разработки систем химико-технологического мониторинга / В.Н. Воронов, П.М. Готовцев, О.В. Егошина, Д.С. Сметанин // Теплоэнергетика. 2010. № 7. С. 24—27.

2. **Воронов В.Н., Верховский А.Е., Готовцев П.М.** Математическое моделирование водно-химических режимов. М: Издательский дом МЭИ, 2010.

С.Д. Горшенин, соиск.; рук. Г.В. Ледуховский, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЯЧЕЕЧНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В БАРБОТАЖНОЙ СТУПЕНИ ДЕАЭРАТОРА

Рассматривается задача разработки эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках термических деаэраторов атмосферного давления с затопленным барботажным устройством.

Математическая модель включает две подмодели: подмодель движения воды в деаэраторном баке и подмодель процесса десорбции газа. Подмодель движения реализуется средствами прикладного программного комплекса FlowVision. В основу подмодели процесса десорбции газа положена ячеечная модель, которая позволяет учесть влияние на скорость процесса деаэрации характеристик циркуляции потоков воды в баке. Это обеспечивается заданием параметра идентификации, который назван параметром циркуляции теплоносителя и определен как отношение расходной и циркуляционной составляющих скоростей потока воды. Значение этого параметра определяется расчетом при использовании подмодели движения. Таким образом, удалось получить модель деаэрации, включающую только один параметр идентификации – коэффициент массопередачи по рассматриваемому газу. Для практического использования полученной модели необходима разработка ее эмпирического обеспечения.

Идентификация модели выполнена с использованием данных экспериментальных исследований, проведенных на деаэраторе ДСА-300 в условиях промышленной эксплуатации. Эмпирическое обеспечение получено в виде критериального уравнения для расчета коэффициента массопередачи по растворенному кислороду:

$$Sh = \frac{k_m d}{D_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}} = 7{,}448 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-0{,}401} d_{\text{б}}^{\,-0{,}642}, \qquad (1)$$

где Sh — критерий Шервуда; k_m, кг/(м^2·с) — средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду; d, м — диаметр отверстий барботажного устройства; $D_{\text{ж}}$, м^2/с — коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде; $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{ж}}$, кг/м^3 — плотности соответственно пара и воды; $d_{\text{б}}$, кг/т — удельный расход пара на барботаж.

Модель использована при разработке проектов модернизации деаэраторов ДА-50 мини-ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания» (Ивановская обл.), деаэраторов ДА-100 участка вторичных энергоресурсов коксохимического производства ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

В.Г. Дегтяренко, О.А. Легезо, студенты; рук. П.М. Готовцев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОДПИТКА СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТАЛЫМИ ВОДАМИ

Для минимизации затрат на подпитку систем оборотного охлаждения в зимний период предлагается использовать в качестве подпиточной воды талый снег, собранный на улицах города коммунальными службами. В связи с жизнедеятельностью человека в мегаполисе, снег, собранный на автомобильных дорогах и пешеходных улицах города, сильно загрязнен и его необходимо очистить [1]. Для подпитки систем оборотного охлаждения талый снег достаточно очистить от следующих показателей: нефтепродукты; окисляемость [2, 3]. Для снижения содержания нефтепродуктов, окисляемости и железа к рассмотрению представлено следующее техническое решение:

- напорная коагуляция в контактных емкостях;
- частичное осветление на сетчатых фильтрах;
- осветление на механических фильтрах;
- удаление нефтепродуктов на фильтрах-нефтеловушках.

Предлагаемая схема очистки снега требует относительно низких капитальных затрат по сравнению с аналогичными схемами очистки воды. При разработке технологической схемы были учтены достоинства и недостатки существующих современных технологий предварительной очистки воды.

Также предусмотрена схема минимизации сточных вод с установки очистки снега, что позволит минимизировать затраты на утилизацию сбрасываемых веществ.

Использование снега в качестве подпиточной воды систем оборотного охлаждения позволит сократить затраты на исходную воду, а также позволит ТЭЦ взымать определенную плату с коммунальных служб за утилизацию собранного снега.

Литература

1. **Кишневский В.А.** Современные методы обработки воды в энергетике. Одесса: ОГПУ,1999.

2. **Кульский Л.А., Строкач П.П.** Технология очистки природных вод. Киев: Вища школа, 1986.

3. **Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф.** Водоподготовка в энергетике. М.: Издательство МЭИ, 2003.

В.Г. Дегтяренко, студ.; рук. И.С. Никитина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НОМОГРАММ ДЛЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ВОДЫ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ КОРРОЗИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОСЕТИ. ПРОТИВОТОЧНОЕ NaCl-ИОНИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНИОНИТОВ-ОРГАНОПОГЛАТИТЕЛЕЙ

Химически очищенная вода может быть использована для подпитки тепловых сетей [1]. Тепловые сети представляют собой многокилометровые трубопроводы, которые нуждаются в техническом обслуживании и имеют свой определенный срок службы. Для предотвращения коррозии и увеличения срока службы сетевых трубопроводов рассмотрен вариант использования метода номограмм для выбора технологии очистки подпиточной воды [2].

Одной из технологий очистки добавочной воды для подпитки тепловых сетей является технология противоточного NaCl-ионирования с использованием анионитов органопоглотителей [3]. Представленная технология включает в себя достоинства классической схемы совместного NaCl-ионирования, достоинства противоточной технологии ионного обмена и достоинства использования органоемких анионитов.

Совместное использование вышеперечисленных технологий позволит не только увеличить срок службы сетевых трубопроводов, но и снизить затраты на реагенты, фильтрующие материалы и снизить количество воды на собственные нужды [4].

Литература

1. **СНИПII-**35 – 76. Котельные.

2. **Фошко Л.С., Лосев А.С., Прохоров Ф.Г**. Натрий-хлор-ионирование воды для промышленных котельных и испарителей // Теплоэнергетика. 1959. № 1.

3. **Сергеев В.В., Симкина В.М., Храмчихин А.М.** Использование органопоглощающих ионитов в схеме приготовления обессоленной воды // Энергетик. 2001. № 8.

4. **Внедрение** противоточной технологии «UP.CO.RE» на ВПУ по обессоливанию ТЭЦ-12 «Мосэнерго» / И.И. Боровкова, И.С. Балаев, С.Л. Громов и др. // Электрические станции. 2000. № 5.

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

О ВОПРОСАХ ЗАНОСА ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА СОЕДИНЕНИЯМИ КРЕМНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В БАРАБАНАХ ВЫСОКОГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Зачастую перед персоналом химического цеха стоит задача оценить потенциальную возможность перехода примесей из котловой воды в насыщенный и перегретый пар. Кремниевая кислота, являясь слабым электролитом (координационное число $n = 1 \div 3$), в значительной степени подвержена влиянию значения pH, характеризующего степень изменения формы соединения, т.е. отклонение системы от чисто молекулярной (или ионной) формы [1]. Нормы ПТЭ строго регламентируют концентрацию кремния в парах, питательной воде, конденсате турбины, добавочной воды из бака запаса конденсата [2].

Принимая во внимание, что наибольшая концентрация соединений кремния наблюдается в котловых водах, особый интерес вызывают изучение и проведение ряда экспериментов, направленных на получение зависимостей поведения силикатов от изменения термодинамических и физико-химических параметров. В ходе работы были получены и проанализированы:

1) зависимость концентрации кремниевой кислоты от значения pH в барабане котла-утилизатора при номинальных параметрах и переменных режимах;

2) зависимость концентрации кремниевой кислоты в барабане котла-утилизатора от величины непрерывной и периодической продувки в присутствии хеламина как корректирующего реагента.

Литература

1. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Воднохимические режимы ТЭС и АЭС. М.: Издательство МЭИ, 2009.

2. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации Минэнерго России. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

К.Е. Кузина, студ.; рук. О.В. Егошина, доц. (НИУ «МЭИ»)

ИЗМЕРЕНИЕ pH СИЛЬНО РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРОВ

Показатель pH — один из важнейших параметров, характеризующих коррозионную активность водной среды и режимов водоподготовки. На одноконтурных АЭС с реакторами типа РБМК используется только бескоррекционный водный режим. К недостаткам этого режима относится возможность снижения pH до значений ниже 6.5. В России практически на всех ТЭС с энергоблоками СКД используются окислительные водные режимы. При этих режимах необходимо иметь питательную воду высокого качества со значением удельной электропроводности (УЭП) менее 0,1 мкСм/см и pH 7,5. Именно поэтому измерение pH сильноразбавленных растворов является одной из актуальных задач химического контроля. Для изучения зависимости pH раствора аммиака при разных температурах от значений электропроводности использовались формулы:

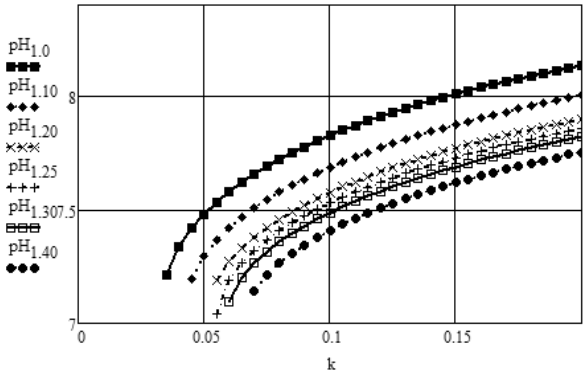


Рис. 1. График зависимости изменения pH от электропроводности

$$\mathrm{pH} = 7 - \lg\left(\frac{p_b}{2} - \sqrt{\frac{p_b^2}{4} - q_b}\right), \qquad (1)$$

где $p_b = 18{,}25k\dfrac{\lambda_{H^+}(25) + \lambda_{OH^-}(25)}{\lambda_{H^+} + \lambda_{M^+}}$, $q_b = \dfrac{\lambda_{OH^-} + \lambda_{M^+}}{\lambda_{H^+} - \lambda_{M^+}} K_w 10^{14}$.

Результаты расчета показали, что при изменении УЭП от 0,055 до 0,15 мкСм/см значение pH меняется в диапазоне 7,3÷7,8 при 25 ºС. Для измерения pH сильноразбавленных растворов в промышленных условиях возможно использование pH-метров нового поколения.

Н.А. Макарищева, студ.; рук. О.В. Егошина, доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА

Целью данной работы является выявление достоверности и точности измерений массовой концентрации растворенного в воде кислорода на объектах теплоэнергетики, где требуется контроль растворенного кислорода [1]. Аналитический расчет динамических характеристик датчиков ДК-409 и OXYGOLD120 выполнен с целью построения аппроксимирующих моделей в виде передаточных функций сравнения динамических свойств исследуемых анализаторов.

По данным Томской ТЭЦ-3 построены графики экспериментальной (кривая *1*) и аппроксимирующей (кривая *2*) характеристик.

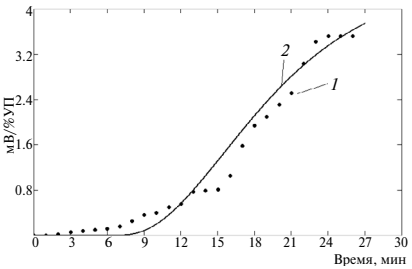


Рис. 1. Графики экспериментальной и аппроксимирующей характеристик датчика ДК-409

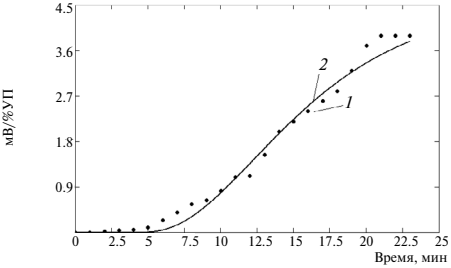


Рис. 2. Графики экспериментальной и аппроксимирующей характеристик датчика OXYGOLD120

Аппроксимирующая передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{K}{(Ts+1)^3}\exp(-\tau s)\,.$$

Соответствующая этой передаточной функции переходная характеристика

$$h(t) = K(1-(1+(t-\tau)/T+(t-\tau)^{\uparrow}2/[\![2T]\!]^{\uparrow}2)\exp((-t+\tau)/T)\,,$$

где K — коэффициент передачи объекта; T — постоянная времени; τ — время запаздывания [2].

Результаты аналитического расчета показали, что динамические характеристики анализатора FLXA21 с датчиком OXYGOLD 120 выше, чем у анализатора МАРК-409 с датчиком ДК-409.

Литература

1. **Живилова Л.М.** Автоматический химический контроль теплоносителя ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

Е.О. Московкина, студ.; рук. С.А. Лившиц, к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПОДОГРЕВА МАЗУТА В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ ТЭС

Мазут как топливо обладает рядом несомненных преимуществ: высокой теплотворной способностью, малым содержанием золы, но он имеет ряд серьезных недостатков: многоступенчатость подготовки к сжиганию, нестабильный состав каждой партии, высокое содержание серы, высокая температура застывания, высокая стоимость.

Основным способом хранения мазута является циркуляционный подогрев мазута.

Нами проанализировано две модели, рассматривающие процесс циркуляционного подогрева мазута, описанные в [1, 2]. По результатам сравнения были сделаны следующие выводы:

1) модель, приведенная в [1], является более точной по сравнению с моделью, приведенной в [2];

2) при количестве резервуаров больше четырех необходимо использовать для описания теплогидравлических процессов модель, приведенную в [2]. В остальных случаях можно использовать как модель, приведенную в [1], так и модель, приведенную в [2], принимая во внимание тот факт, что модель, приведенная в [1], является более точной, а модель, приведенная в [2], — менее трудоемкой;

3) циркуляционный подогрев мазута на ТЭС до сих пор является малоизученным вопросом теплоэнергетики. Необходима разработка новых универсальных методов для его математического описания.

Литература

1. **Шагеев М.Ф.** Моделирование и исследование циркуляционного подогрева мазута в раздельных 4-резервуарных схемах мазутных хозяйств ТЭС: Дис. … канд. техн. наук. Казань,2003.

2. **Иванов Н.В** Моделирование и исследование циркуляционного подогрева мазута в одноступенчатых совмещенных тепло-технологических схемах растопочных мазутных хозяйств ТЭС: Дис. … канд. техн. наук. Казань, 2003.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ЛИГНИТОВ ГОРНОСТАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВКО

Потребность в угольном топливе в Казахстане с каждым годом растет. Все новые технологии позволяют находить альтернативу углю, но пока они не совершенны уголь остается одним из основных видов топлива для получения энергии. Новые способы сжигания разных видов угля дают возможность использовать низкосортный, непроектный уголь, эффективность которого практически не уступает отборному «элитному» углю, при правильном его изучении и подбору к нему определенной технологии, так как многолетний опыт сжигания углей непроектных марок говорит о том, что даже использование очень близких по теплотехническим свойствам углей требует проведения специальных работ подготовительного характера [1].

Для проведения технического анализа (определение влажности, зольности, выхода летучих, серы, теплоты сгорания) использовали стандартный комплекс методов.

Были исследованы образцы различных скважин. Проведена обработка данных. Получены результаты влажности, зольности, выхода летучих веществ, серы, теплоты сгорания [2].

Результаты анализа показали, что лигниты Горностаевского месторождения возможны для использования в качестве топлива для котельных, а так как этот уголь идет попутным полезным ископаемым к кобальтоникелевым рудам, которые являются основным добываемым сырьем данного месторождения, то с экономической стороны целесообразно и окупаемо. Все это подтверждается полученными экспериментальными исследованиями и значениями влажности, зольности, летучих веществ и теплоты сгорания.

Предложения по дальнейшим исследованиям – изучить вредное воздействие при сжигании низкосортного угля (лигнитов), выбрать оптимальный способ и оборудование для сжигания топлива.

Литература

1. **Воронцова Е.С., Тайлашева Т.С.** Особенности использования непроектных углей на ТЭС // Теплоэнергетика. Энергия 2012. Седьмая региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученных (с международным участием) М.: ИГЭУ, 2012. Т.1. № 1. — С. 3—6.

2. **Козловский Е.В.** Горная энциклопедия. Т. 3. М.: Сов. Энциклопедия, 1987. С. 560.

А.Ю. Панамарева, асп.; рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф.
(СамГТУ, г. Самара)

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД НОВОКУЙБЫШЕВСКОЙ ТЭЦ-1

В настоящее время на территории Новокуйбышевской ТЭЦ-1 отсутствуют очистные сооружения поверхностных и производственных сточных вод. Производственные сточные воды образуются от продувки котлов на территории мазутного хозяйства. Основными загрязняющими веществами производственных сточных вод являются нефтепродукты, железо, медь. Поверхностный сток образуется при выпадении атмосферных осадков, при поливах территории. Основными загрязняющими веществами поверхностных сточных вод являются взвешенные вещества и нефтепродукты.

В табл. 1 приводятся концентрации основных загрязняющих компонентов сточных вод и их ПДК.

Таблица 1

Концентрации загрязняющих компонентов сточных вод Новокуйбышевской ТЭЦ-1 и их ПДК

Наименование загрязняющего компонента	Концентрация компонента в стоке, мг/л	Нормативная концентрация, мг/л
Взвешенные вещества	20	<9,3
Железо общее	0,33	<0,1
Медь	0,006	<0,001

Предлагается установка сооружений для очистки смешенных стоков. Под воздействием реагента и воздуха железо, содержащееся в сточной воде, окисляется и переходит из двухвалентного в трехвалентное состояние с образованием гидроксида, который является хорошим коагулянтом. Гидроксид меди также образует хлопья, для их укрупнения и ускорения осаждения в сток дозируется флокулянт. Для удаления скоагулированных на предыдущей стадии мелкодисперсных загрязнений, а также мутности воды, используется фильтрация через механические и активные фильтрующие загрузки. В качестве загрузки осветлительных фильтров предлагается использовать сорбент на основе природного минерального сырья и глауконита, который позволит провести тонкую очистку от остатка нефтепродуктов, снизить содержание тяжелых цветных металлов и азотсодержащих соединений. Загрузка сорбционных фильтров — активированный уголь для извлечения из стока растворенных нефтепродуктов.

Проведен расчет срока окупаемости, согласно ему окупаемость установки составила 7,7 лет.

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

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ РАЗРЕЗА «КАРАЖЫРА» ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

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-е 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.

Использовались стандартные методики для определения влажности, зольности, летучих веществ и теплоты сгорания ВУТ. Исследовали уголь месторождения Каражыра ВКО и его пригодность для приготовления ВУТ [5].

Использование исследуемых углей для приготовления ВУТ оправдано: снижаются удельные нормы топлива на выработку единицы тепловой энергии.

Предложения по дальнейшим исследованиям — разработать оптимальную технологическую схему для сжигания изученного 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/o-komitete/polozhenie

3. **По запасам** нефти в мире Казахстан — на 12 месте, КУРСИВ.Kz/- ВР. 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

5. **Каражыра** ЛТД, ТОО. URL: http://4851.kz.all.biz

К.И. Соколов, студ.; рук. Т.С. Любова, к.ф.-м.н., доц.
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ПАРОКИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ

В мире сложилась сложная экологическая ситуация, в свете которой современная технология ищет новые решения химических и энергетических проблем. Одним из таких технологических решений является широкомасштабная газификация твердого топлива, позволяющая получить экологически чистое топливо и использовать современные тепловые схемы тепловых электростанций, работающих с газификацией твердого топлива, по запасам которого Россия занимает первое место в мире.

В данной работе проведен расчет газификации под давлением 2 МПа на парокислородном дутье. Для получения состава газа используется александрийский бурый уголь.

Проведен расчет состава генераторного газа в зависимости от температуры. Был выбран интервал температуры от 500 до 1200 °С.

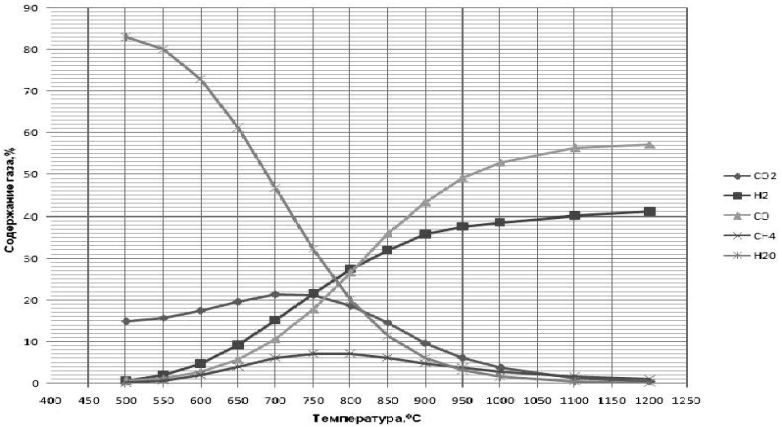


Рис. 1. График зависимости состава генераторного газа от температуры

Литература

1. **Белосельский Б.С.** Технология топлива и энергетических масел. М.: Издательство МЭИ, 2005. — 348 с.

2. **Альтшулер В.С., Сеченов Г.П.** Процессы в кипящем слое под давлением. М.: Издательство АН СССР, 1963. — 216 с.

3. **Канторович Б.В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Издательство АН СССР, 1958. — 598 с.

А.Я. Сорокина, А.Ю. Будаева, студенты; рук-ли А.Б. Ларин, к.т.н., доц., Н.А. Еремина, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА «МЕМБРАННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ТЭС И АЭС»

В настоящее время на ТЭС все чаще начинают внедряться мембранные технологии очистки воды, и появляется необходимость в повышении уровня знаний студентов в данной области.

В задачу данной работы входит: разработка и расчет технологических схем водоподготовки на ТЭС при разном качестве исходной (природной) воды и производительности установки; исследование мембранных технологий в лабораторных условиях и определение технологических характеристик и затрат реагентов; создание автоматизированной обучающей системы (АОС) для подготовки студентов специальности «Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС» к работе на мембранных установках водоподготовки.

На кафедре ХХТЭ ИГЭУ разработана методика расчета мембранных установок [1] и смонтирован лабораторный стенд «Установка обратного осмоса». Также ведется разработка «Автоматической обучающей системы «Мембранные методы очистки воды».

Основной целью данной части работы является повышение эффективности обучения и подготовка студентов средствами разработанного мультимедийного гипертекстового учебника, позволяющего изучить эксплуатационные режимы работы и дальнейшее обслуживание мембранных установок. АОС должен использоваться обучаемыми в качестве опорного материала при самоподготовке и формировать знания по мембранным технологиям очистки воды на ТЭС.

В объем разработки входят следующие разделы: разработка электронного учебника с тестирующей частью и разработка лабораторных работ, позволяющая изучить процессы, происходящие в мембранных установках.

АОС будет состоять из трех частей: информационной, тестирующей и экспериментальной.

АОС выполнен с помощью программы Adobe Flash Professional CS5.

Таким образом, решается задача комплексного освоения новой технологии водоподготовки для энергоблоков ТЭС и АЭС.

Литература

1. **Юрчевский Е.Б., Ларин А.Б.** Расчет технологических схем обессоливания воды на ТЭС с установками обратного осмоса: учебное пособие. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2011. — 84 с.

Р.В. Хабибуллина, асп.; рук. Э.Р. Зверева, к.х.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ОБРАБОТКА ТОПОЧНОГО МАЗУТА ПРИСАДКАМИ

Важнейшей тенденцией развития российской нефтеперерабатывающей отрасли является рост объема выпуска высококачественных нефтепродуктов с одновременным увеличением глубины переработки нефти до 80—85 % к 2020 году. По мере углубления переработки нефти доля прямогонного мазута в котельных топливах снижается, а доля гудрона и тяжелых крекинг-остатков растет, следовательно, качество топочного мазута ухудшается [1].

Повышение качества жидкого топлива и интенсивности его сжигания связано с добавлением в топливо специальных веществ, улучшающих его эксплуатационные свойства — многофункциональных присадок.

Выявлено, что деэмульгирующая присадка Дипроксамин-157 позволяет улучшить эксплуатационные свойства топочных мазутов (снизить вязкость, температуру застывания) при концентрации присадки в мазуте 0,1—0,5 % (масс.).

Нами были проведены экспериментальные исследования на определение условной вязкости, температуры застывания мазута, а также воды, содержащейся в мазуте при различных концентрациях присадки на основе Дипроксамина-157.

Как показали экспериментальные исследования, наблюдается снижение температуры застывания на 23,08 % и условной вязкости исходного мазута на 8,8 % (проценты выражены в относительных величинах), также Дипроксамин-157 обеспечивает высокую эффективность (до 90 %) обезвоживания мазутов.

Разработана технологическая схема дозирования присадки к мазуту.

Отечественный и зарубежный опыт применения многофункциональных присадок к топочному мазуту показывает их целесообразность, а в случае сжигания высокосернистых мазутов — и необходимость, прежде всего, с точки зрения продления срока службы энергетического оборудования и надежности его работы, а также по экологическим соображениям.

Литература

1. **Улучшение** реологических свойств топочных мазутов / Э.Р. Зверева, И.А. Мутугуллина, Р.В. Зиннатуллина, А.Р. Хабибуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 7—8.

2. **О механизме** действия присадок в топливной дисперсной системе / С.Т. Башкатова, И.Н. Гришина, Л.А. Смирнова и др. // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 5.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В ПЕРЕМЕННОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ

Современные методы водоподготовки все чаще основываются на использовании интегрированных мембранных технологий. Широкое распространение получают установки обратного осмоса (УОО). Их используют в быту, медицине, микроэлектронике, на крупных промышленных предприятиях и в энергетике. При проектировании такого оборудования с целью качественного подбора установок, мембранных элементов, реагентов, отладки режимов рекомендуется проведение пилотных испытаний. Работа УОО зависит от температурных режимов, системы рециркуляции [1], качества входной воды. Поэтому целью испытаний было изучение влияния изменений температуры исходной воды на режимы работы установки, а также влияния системы рециркуляции на изменение температуры воды в системе.

Испытания проводились на обратноосмотической установке с одной мембраной 2540 на подготовленной воде (после установки механической фильтрации и умягчения). В результате проведенных экспериментов были получены зависимости температуры воды на входе в УОО от времени фильтрования при разной степени рециркуляции. Был определен диапазон влияния рецикла на изменение температуры при работе на проточной воде, который не превышает 5 %. При работе на модельном растворе (схема с замкнутым циклом, т.е. с возвратом концентрата и фильтрата в исходную емкость) наблюдается постоянный рост температуры, поэтому необходимо вводить температурную компенсацию [2]. Также были получены зависимости параметров работы установки и качества очищенной воды от изменения температуры входной воды.

Таким образом, в работе исследованы параметры работы пилотных установок и выполнен их анализ. Приведены рекомендации к созданию пилотных установок, имеющие целью получение данных по проектированию промышленных УОО и определение их эксплуатационных характеристик.

Литература

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

2. **Dow Chemical Corp.** Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual / Dow Water Solutions. Dow: Chemical, 2008.

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

РАЗРАБОТКА АОС ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000

В ИГЭУ смонтирован и введен в эксплуатацию полномасштабный тренажер блочного щита управления энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. В рамках освоения тренажера была разработана комплексная программа.

Основным назначением программы является обучение ведению водно-химического режима 1-го и 2-го контуров АЭС с ВВЭР-1000 студентов специальностей «Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС» и «Атомные электростанции». Этот комплекс программ на данный момент используется для обучения студентов на кафедре ХХТЭ ИГЭУ.

В объем АОС 1-го и 2-го контуров входят следующие разделы:

1. Электронный учебник, в котором описано основное оборудование 1-го и 2-го контура, ВХР соответственно 1-го и 2-го контуров, установки спецводоочистки.

2. Тестирующая часть АОС предназначена для контроля степени усвоения знаний студентом. По окончании изучения студентом материала, ему предлагается тест, в результате прохождения которого выдается протокол тестирования.

3. Экспериментальная часть включает лабораторные работы, в них рассматриваются основные режимы работы установок спецводоочисти СВО-1 и СВО-2 [1]. Лабораторные работы выполнены с помощью программ AdobeFlashProfessionalCS5 и Курсограф. В комплекс входит практическая работа «Водный режим и химконтроль 1-го контура АЭС с ВВЭР-1000». В ней представлена схема 1-го контура с точками отбора проб и нормируемыми показателями в этих точках. Сама программа имитирует нарушение ВХР питательной воды. Эти нарушения студент определяет самостоятельно по показаниям качества воды в данной точке. Обучаемый делает вывод о причине нарушения ВХР и строит алгоритм поиска причины нарушения и его устранения. Эта программа имеет теоретическую, практическую и тестирующую части. Лабораторные работы выполнены с помощью программ AdobeFlashProfessionalCS5.

В отличие от предыдущих работ в данной работе рассматриваются лабораторные работы по 1-му контуру, которые уже вводятся в учебный процесс на кафедре ХХТЭ ИГЭУ.

Это наиболее универсальный способ приобретения знаний и навыков и подготовки к реальной эксплуатации сложных систем обеспечения ВХР 1-го и 2-го и второго контуров.

Литература

1. **Воронов В.Н., Ларин Б.М., Сенина В.А.** Химико-технологические режимы АЭС с ВВЭР. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

Секция 46

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. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

При формировании ЕЭС России вблизи крупных потребителей энергии были построены крупные ТЭЦ или ГРЭС. Эти источники снабжают и других потребителей региона, при этом электрические сети в большинстве случаев загружены полностью. Для покрытия растущего спроса на электроэнергию необходимо не только расширять источники генерации энергии, но и развивать электросетевое хозяйство, что требует существенных затрат. В настоящее время существующие источники обеспечивают в полной мере теплоснабжение крупных городов. В то же время в городах с населением менее 200 тыс. человек (таких городов с населением 20—200 тыс. более 620) их теплоснабжение в основном за счет котельных, большая часть из которых морально и физически устарели. Появление современных, высокоэффективных установок малой средней мощности на базе ГТУ и ГПА, имеющих в автономном цикле КПД выше 40 %, позволяет обеспечить ввод мощностей в небольших городах взамен устаревших котельных на базе комбинированного производства с использованием теплоты топлива до 90 %. Строительство установок рядом с потребителем позволит в значительной степени разгрузить существующие линии электропередачи и тем самым уменьшить вложения в сетевое хозяйство.

В конечном итоге эффективность энергоснабжения определяется ценой электроэнергии у потребителя. Для оценки эффективности энергоснабжения были проведены расчетные исследования. В качестве критерия рассматривалась себестоимость электроэнергии у потребителя. Для сравнения использовались варианты строительства крупных энергоблоков и распределенных источников малой и средней мощностей (до 25 МВт) на базе малых и средних городов с использованием когенерации. Оценка себестоимости электроэнергии при строительстве крупных станций составила от 3 до 4,30 руб. в зависимости от протяженности линий электропередачи, а для распределенной генерации себестоимость составила 2—2,3 руб. Ана-

лиз результатов показывает, высокий потенциал использования распределенной энергетики для энергоснабжения [1].

Литература

1. **Группировка** городских населенных пунктов по численности населения по субъектам Российской Федерации [Электронный ресурс] http://www.perepis-2010.ru.

А.А. Благочиннов, студ.; рук А.Д. Грига, д.т.н., проф.
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОСРЕДСТВОМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сооружение установок комбинированного цикла и ПГУ (парогазовых установок) является основной тенденцией развития мировой теплоэнергетики в последние два десятилетия [1].

Альтернативой бинарной ПГУ является ГПТУ (газопаровая турбоустановка). Ее основное отличие от бинарной состоит в отсутствии конденсационной паровой турбины с конденсатором и соответствующей системой охлаждения.

Состав оборудования ГПТУ проще, а удельные капвложения меньше, чем в ПГУ бинарного цикла. Пониженные капзатраты предопределяют примерно на 7—8 % более низкую стоимость производства электроэнергии на ПГУ смешения и тем самым показывают ее достоинства и перспективность [2, 3]. Указанные цифры получены для случая безвозвратных потерь воды, введенной в КС ГТУ. Но если в установке конденсация влаги происходит в сетевых подогревателях, то обеспечивается возврат рабочего тела и существенным образом увеличивается коэффициент использования тепла топлива установкой (до 88—92 %).

Реализация предложенных технических решений позволит повысить эффективный КПД ГТУ с подводом пара в газовый тракт (ГПУ) до максимально достигнутого уровня бинарных парогазовых энергоустановок. Кроме того, за счет существенно большего, чем в бинарных газопаровых установках, удельного подвода тепла на килограмм воздуха повышается общий коэффициент использования тепла при работе с отбором на теплофикацию.

Литература

1. **ПГУ смешения:** проблемы и перспективы / Ю.С. Елисеев, В.Е. Беляев, А.С. Косой, М.В. Синкевич // Газотурбинные технологии. 2006. № 2. С. 18—20.

2. **Стырикович М.А., Фаворский О.Н., Батенин В.М.** Парогазовая установка с впрыском пара: возможности и оптимизация параметров цикла // Теплоэнергетика. 1995. № 10. С. 52—57.

3. **Морозенко М.И., Землянский А.В.** Исследование эффективности контактной когенерационной ГТУ // Материалы XII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М., 2004. — С. 32—34.

А.В. Благочиннов, студ.; рук А.Д. Грига, д.т.н., проф.
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

ГЕНЕРАЦИЯ БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОПАРОВОЙ ТУРБОУСТАНОВКИ

В последние годы проблема нехватки пиковых мощностей (электрических и тепловых) встает довольно остро. Одной из возможностей ее решения может быть строительство пиковых ГТУ с энергетическим впрыском пара. В таких установках увеличение мощности достигается увеличением расхода рабочего тела [1].

В газопаровых установках (STIG) и (HAT и CHAT) пары воды вместе с уходящими продуктами сгорания выбрасываются в атмосферу [2].

Масштабная утилизация низкопотенциального тепла конденсации водяных паров, в частности для нужд теплофикации, и возврат рабочего тела (пара) в цикл реализуется в схеме ГПТУ, представленной на рис. 1.

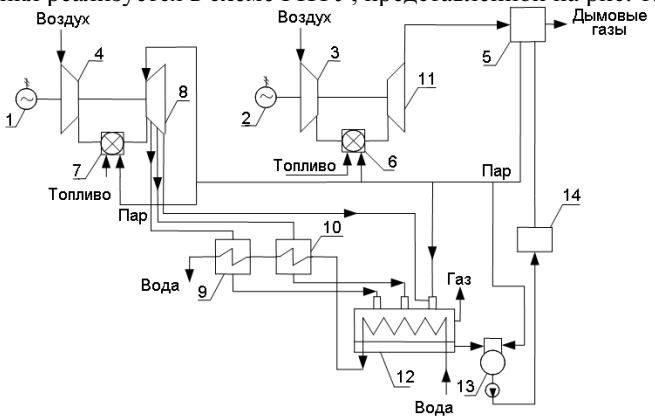


Рис. 1. Схема газопаровой турбоустановки

ГПТУ состоит из двух независимых двигателей, которые включают: генераторы *1* и *2*, компрессоры *3* и *4*, котел-утилизатор *5*, камеры сгорания *6* и *7*, газовую турбины *8*, сетевые подогреватели *9* и *10*, газопаровую турбину *11*, эжектор *12*, деаэратор *13*, конденсатоочистное устройство *14*.

Реализация предложенных технических решений позволит повысить эффективный КПД ГТУ с подводом пара в газовый тракт (ГПУ) до максимально достигнутого уровня бинарных ПГУ.

Литература

1. **Стырикович М.А., Фаворский О.Н., Батенин В.М.** Парогазовая установка с впрыском пара: возможности и оптимизация параметров цикла // Теплоэнергетика. 1995. № 10. С. 52—57.

2. **ПГУ смешения:** проблемы и перспективы / Ю.С. Елисеев, В.Е. Беляев, А.С. Косой, М.В. Синкевич // Газотурбинные технологии. 2006. № 2. С.18—20.

А.В. Бублей, студ.; рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПГУ КЭС НА БАЗЕ LMS 100 ПРОИЗВОДСТВА GENERAL ELECTRIC

ГТУ LMS 100 производства GENERAL ELECTRIC (GE) обеспечивает на сегодня самый высокий КПД в открытом цикле (43,5 %). Один из основных элементов ГТУ LMS 100 — система промежуточного охлаждения воздуха при сжатии в компрессоре, которая дает возможность работы с полной мощностью в самые жаркие дни (до 26,7 °С) [1]. ГТУ с такой технологией может найти применение в ОЭС Юга, поскольку данный регион характеризуется жарким климатом и продолжительным стоянием высоких температур наружного воздуха в течение года.

Для исследований приняты климатические условия г. Краснодар. Были проведены расчеты показателей экономичности как для двухконтурной ПГУ КЭС на базе LMS 100, так и на базе ГТУ, находящихся в том же диапазоне мощности: ГТЭ-110 фирмы «НПО» Сатурн» и GT11N2 фирмы ALSTOM. Также были определены годовые показатели экономичности. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели работы двухконтурной конденсационной ПГУ

ГТУ	LMS 100			ГТЭ-110			GT11N2		
Температура наружного воздуха, °С	–12	1,5	25	–12	1,5	25	–12	1,5	25
Электрическая мощность ПГУ (нетто) МВт	115,2	115,6	111,9	179,0	168,5	139,0	177,9	172,7	155,8
КПД ПГУ (нетто), %	50,7	50,6	49,3	49,3	49,6	47,5	48,3	48,9	47,9
Годовой удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, г/(кВт·ч)	247,91			256,24			255,33		

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что работа двухконтурной ПГУ КЭС на базе LMS 100 является более стабильной по сравнению с аналогичными схемами на базе других ГТУ, поскольку изменения мощности ПГУ при колебаниях температуры наружного воздуха менее существенны. В годовом разрезе ПГУ на базе LMS 100 обеспечивает наилучшие показатели экономичности среди рассматриваемых вариантов.

Литература

1. **Газотурбинные** энергетические установки / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осика. М.: Издательство МЭИ, 2011. — С. 428.

В.О. Быков, студ.; рук. М.М. Султанов, к.т.н.
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕПЛОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ВОДОРОДНЫМ ВЫСОКОНАПОРНЫМ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ

В настоящее время теоретические исследования и практическое применение водородно-кислородных парогенераторов (ВКПГ) за рубежом находят широкое применение. В России опыт разработки и внедрения водородной технологии для производства электроэнергии и тепла приведены в [1].

Активное внедрение альтернативных источников энергии на базе водородных парогенераторов ограничивается техническими и технологическими особенностями процесса использования водорода в качестве топлива.

Эффективный (расчетный) КПД энергоустановки с ВКПГ достигает следующих значений: прирост КПД для схем электростанций с надстройкой ВКПГ составляет 2,5÷10 %; для автономных энергоустановок — 30 %.

Авторами предлагаются варианты технологических схем производства электричества и тепла по аналогу действующих схем парогазовых установок (ПГУ) с высоконапорным парогенератором (ВНПГ). При этом в качестве топлива предлагается использовать водород и кислород.

Оценку КПД энергоблока с водородным ВНПГ получаем, преобразовав формулу КПД ПГУ-ВНПГ

$$\eta_{\text{ПГУ}}^{\text{H}_2} = \eta_{\text{ПС}} + \frac{\eta_{\text{ПС}}}{1 + Q_{\text{ПС}}/Q_{\text{ГС}}} \left(\eta_{\text{ГС}}/\eta_{\text{ПС}} - 1\right), \qquad (1)$$

где $Q_{\text{ПС}}$ — подведенное тепло паровой части в цикл, МВт; $Q_{\text{ГС}}$ – подведенное тепло газовой части в цикл, МВт.

Схемы могут быть представлены в двух вариантах: 1) ПГУ-ВНПГ для сжигания водорода и кислорода; 2) ПТУ-ВНПГ для сжигания водорода и кислорода (с установкой компрессора как на валу паровой турбины, так и в отдельном исполнении).

Для оценки эффективности схем необходимо разработать математическую модель расчета параметров, определения эффективной мощности теплосиловой установки, расчета КПД и показателей экономичности энергоблока.

Разработанная модель расчета позволит реализовать технологию сжигания водорода на новых автономных альтернативных электростанциях, а также на действующих электростанциях.

Литература

1. **Малышенко С.П.** Исследования и разработки ОИВТ РАН в области технологий водородной энергетики // Альтернативная энергетика. 2011. № 3 (95).

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПРИ ВПРЫСКЕ ВОДЯНОГО ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В рамках данной работы рассматривается влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания ГТУ на параметры работы котла-утилизатора (КУ). Был проведен термодинамический расчет КУ, установленного за ГТУ на базе двигателя НК-37 [1].

Расчет КУ проводился при фиксированных параметрах (давление, температура) перегретого пара, питательной и сетевой воды. Методика расчета ГТУ и КУ, принятая за основу, приведена в [2]. Основные результаты расчетов ГТУ с КУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты теплового расчета ГТУ с КУ

Параметр	Значение параметра при расходе впрыскиваемого пара $G_{\text{пара}}$, % общего расхода воздуха, поступающего в КС				
	0	1	2	3	4
Эффективный КПД ГТУ η_e	0,343	0,354	0,359	0,357	0,363
Тепло, переданное в КУ $Q_{\text{КУ}}$, МВт	42,93	43,69	45,12	46,96	48,11
Электр. мощность ГТУ $N_{\text{Э}}$, МВт	30,18	31,96	33,14	33,77	35,16
Удельный расход топлива d, кг/(кВт·ч)	0,222	0,210	0,202	0,199	0,191
Производительность КУ $D_{\text{ПП}}$, кг/с	15,32	15,63	16,19	16,97	17,44

Анализируя результаты расчетов, можно отметить, что впрыск водяного пара в камеру сгорания ГТУ позитивно влияет как на работу самой ГТУ, так и на работу котла-утилизатора. Снижается негативное воздействие на окружающую среду. Увеличивается выработка электрической энергии и перегретого пара, при этом снижение удельного расхода газообразного топлива достигает 14 % [1].

Литература

1. **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. С. 23—27.

2. **Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В.** Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. М.: Машиностроение, 1973.

И.А. Долгушин, асп.; рук-ли А.С. Седлов, д.т.н. проф. (НИУ «МЭИ»), Г.А. Рябов, к.т.н., зав. лаб. (ОАО «ВТИ»)

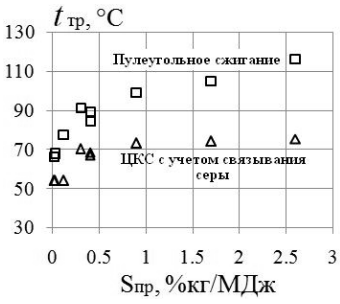
УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ УГОЛЬНЫХ ТЭЦ

Для котлов самой значимой потерей тепла является потеря тепла с уходящими газами — q_2, %. Снижение температуры уходящих газов и полезное использование их тепла в цикле ТЭС позволяет повысить не только КПД котла, но и всей станции в целом.

Агентом для охлаждения газов может служить вода, воздух или другие среды. Существуют различные схемы отъема тепла от газов: 1) с непосредственной передачей полезной теплоты охлаждающему агенту; 2) с передачей полезной теплоты с помощью промежуточного теплоносителя, обычно воды.

Различают охлаждение газов до температуры сернокислотной точки росы $t_{т.р.}$, °С и до температуры $\vartheta_{ух} > t_{т.р.}$, °С. Существуют схемы с передачей теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих газах при охлаждении до $\vartheta_{ух} = t_{т.р.}$, °С.

Определяющим фактором во всех случаях является вид угля — содержание серы, зольность, содержание щелочных соединений в золе, доля уноса летучей золы. Так как это определяет температуру сернокислотной точки росы и соответственно максимально возможное количество тепла, которое можно передать.



$S_{пр}$, % кг/МДж

Рис. 1. Сернокислотные точки росы при различных способах сжигания угля

Существенное влияние на $t_{т.р.}$, °С, оказывает способ сжигания угля. Так, при сжигании факельным способом связывание SO_x золой в топке не велико, что обуславливает высокую $t_{т.р.} = (100 \div 120)$ °С (большое значение для топлив с $S^р > 2{,}5$ %. При сжигании в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) можно добиться высокой степени связывания SO_x путем добавки известняка в топку. По нашим расчетам при сжигании в ЦКС топлив с $S^р > 2{,}5$ % с эффективностью связывания оксидов серы около 90—95 % не превышает 75—80 °С, а для топлив с $S^р < 1$ % $t_{т.р}$ приближается к температуре конденсации водяного пара при парциальном давлении в уходящих газах (рис. 1).

Таким образом, ЦКС — более приспособленная технология сжигания твердого топлива для снижения температуры уходящих газов, чем сжигание угля пылевидным способом в большом объеме топки.

Д.А. Дякина, асп.; рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДОЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ПГУ-ТЭЦ С КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ

Применение дожигания на ПГУ-ТЭЦ с котлами-утилизаторами (КУ) позволяет увеличить отпуск тепла потребителю, что актуально в условиях холодного климата и повышенного внимания к парогазовым технологиям в России.

Авторами было проведено технико-экономическое исследование эффективности применения дожигания дополнительного топлива на ПГУ-ТЭЦ с КУ для условий г. Москвы при различных точках конструкторского расчета. Исследуемая тепловая схема на базе ГТУ типа SGT-800 содержит двухконтурный КУ. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты технико-экономического исследования дожигания

Температура наружного воздуха, °С	–28	–3,1	-28	–3,1
Показатели ПГУ	Без дожигания		С дожиганием	
Электрическая мощность ПГУ нетто, МВт	69 983	67 454	73 214	67 399
Отпуск тепла от ПГУ, тыс. ккал/с	8,88	4,54	11,1	5,56
Расход топлива на ПГУ, т/ч	11,66	10,83	12,43	11,57
Расход топлива на дожигание, т/ч	0,0	0,0	0,77	0,68
Годовой отпуск электроэнергии, млн кВт·ч	526,6	505,7	536,7	513,3
Годовой отпуск тепла, тыс. Гкал	116,8	104,1	145,1	123,3
Годовой КПД по выработке тепла по физическому методу, %	82,47	82,47	82,47	82,47
Годовой КПД по выработке электроэнергии по физическому методу, %	62,16	58,48	61,88	57,16
Суммарные капиталовложения CAPEX, млн руб.	3358	2595	3508	2718
Дисконтированный срок окупаемости проекта DPBP, лет	15,30	14,47	15,27	12,77
Чистый дисконтированный доход NPV, млн руб.	598	506	637	1251

В результате исследования можно сделать вывод о том, что дожигание топлива позволяет не только увеличить отпуск тепла (на 34 %), но и увеличить NPV энергоблока путем дополнительного отпуска электроэнергии и тепла. Очевидно, что при снижении температуры наружного воздуха, на которую проектируется блок, увеличиваются показатели тепловой экономичности и значения отпуска тепла, но снижается экономическая эффективность.

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

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Решается задача проверки соответствия данных, получаемых от систем технического учета показателей работы оборудования ТЭС, номинальным метрологическим характеристикам системы мониторинга. Процедура такой проверки, заключающаяся в контроле сходимости материальных и энергетических балансов по отдельным единицам и группам оборудования, является необходимой согласно требованиям руководящих документов. От качества получаемых при этом данных о показателях работы оборудования зависит достоверность расчета технико-экономических показателей (ТЭП) и составляющих резерва тепловой экономичности.

Предлагаемые руководящими документами инструменты проверки не позволяют учитывать различную степень достоверности получения каждого отдельного параметра априорной информации. Для исключения этого недостатка предложен метод сведения балансов, разработанный на основе регуляризации Тихонова и матричной модели потоков в системе. Концепция регуляризации сводится при решении задачи к поиску разумного компромисса между минимальным значением невязки балансов по всем узлам и минимальным рассогласованием решения с исходной априорной информацией. Структура системы описывается направленным графом G = (X,V). В качестве узлов графа (x_i) рассматриваются узлы смешения и распределения потоков, а трубопроводы между узлами представляются соответствующими ветвями графа (v_j). Для графа по определенным правилам строится матрица инцидентности **A**. Задача формулируется следующим образом: $\mathbf{AV} + \sigma = 0$, где **A** — матрица инцидентности; **V** — вектор расходов по ветвям графа; σ — числовой параметр, характеризующий погрешность уравнения. Задача регуляризации сводится к задаче минимизации функции $F_c(\mathbf{V},\lambda) = |\mathbf{AV}|^2 + |\lambda(\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)|^2 \Rightarrow \min$, где $|\mathrm{AV}|$ — модуль вектор-столбца невязок балансов по узлам; $\mathbf{V}_0$ — априорная оценка вектора расходов по ветвям графа; λ — диагональная матрица малых положительных параметров регуляризации, которые необходимо подобрать; $|\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|$ — модуль вектор-столбца отклонений вектора расходов от вектора априорных оценок расходов. Для решения задачи предложен ряд методов, имеющих свои недостатки и преимущества: аналитическое и численное решения. Приводятся примеры использования предложенного подхода в практических расчетах ТЭП оборудования КЭС и ТЭЦ.

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

ДОЖИГАНИЕ ТОПЛИВА В СРЕДЕ ВЫХОДНЫХ ГАЗОВ ГТУ С КОТЛОМ–УТИЛИЗАТОРОМ

Дожигание топлива (природного газа) в среде выходных газов ГТУ с котлом-утилизатором позволяет повысить мощность установки и отпуск теплоты внешним потребителям [1, 2]. Цель данного исследования показать возможность использования камер дожигания топлива на ПГУ–ТЭЦ с двигателем НК-18 СТ. В расчетном варианте проектирования ПГУ–ТЭЦ рассматриваются два газотурбинных двигателя типа НК-18 СТ общей мощностью 36 МВт, два котла-утилизатора и противодавленческая турбина малой мощности типа Р с сетевым подогревателем.

В ходе работы были посчитаны основные энергетические величины, а также технико-экономические показатели станции [1, 2]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов ПГУ-ТЭЦ

Количество камер дожигания	Электрическая мощность ГТУ	Электрическая мощность блока ПГУ	Расход топлива в камере дожигания, кг/с	Полная тепловая мощность ПГУ, кВт	Сумма электрической и тепловой мощностей, кВт
1	42 284	64 691	0,399	78 834	143 525
2	42 284	75 444	0,604	115 026	190 468
Количество камер дожигания	Удельные затраты на строительство, руб/кВт	Себестоимость электроэнергии руб/(кВт·ч)	Себестоимость тепловой энергии руб/Гкал	Дисконтированный срок окупаемости, лет (E = 10 %)	Внутренняя норма прибыли IRR, %
1	12 271	1,262	598	3,8	48,2
2	10 772	1,049	655	3,5	77,9

Анализ результатов расчетов показывает, что использование двух камер дожигания топлива на ПГУ-ТЭЦ позволяет получить прирост электрической и тепловой мощностей. При этом себестоимость электрической энергии снижается, а тепловой энергии возрастает. В дальнейшем необходимо формирование методики для выбора типов и режимов использования камер дожигания в схеме ПГУ-ТЭЦ.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2002. — 584 с., ил.

2. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. М.: ИНФРА-М, 2012. — 345 с.

Д.А. Ковалев, асп., Г.В. Сойко, инж., А.В. Бублей, студ.;
рук. В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ПГУ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В мире существует большое разнообразие тепловых схем парогазовых энергоблоков с котлом-утилизатором (КУ) трех давлений с промежуточным перегревом пара. При этом параметры пара по контурам значительно различаются в зависимости от типа и мощности газовой турбины, а также от региона расположения энергоблока.

В реализованных парогазовых установках (ПГУ) с КУ трех давлений с промперегревом применяются докритические параметры острого пара. Однако перспективным направлением является исследование тепловых схем ПГУ с КУ трех давлений на сверхкритические параметры пара.

На кафедре ТЭС НИУ «МЭИ» была разработана принципиальная тепловая схема ПГУ-КЭС с КУ трех давлений в моноблочном исполнении на докритические и сверхкритические параметры пара на базе газотурбинной установки (ГТУ) фирмы Siemens SGT5-8000H. Особенностью тепловой схемы на сверхкритические параметры пара является прямоточное исполнение части высокого давления КУ. Расчеты проводились в программном комплексе Thermoflow для условий ISO 2314:2009.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов тепловой схемы ПГУ-КЭС с КУ трех давлений

Параметр	Размерность	Докритические параметры	Сверхкритические параметры
Давление контура ВД	атм	170	240
Температура контура ВД	°С	600	600
Мощность ПГУ брутто	кВт	577 555	578 955
Мощность ПГУ нетто	кВт	559 017	560 238
Мощность ГТУ брутто	кВт	377 742	377 742
Мощность ПТУ брутто	кВт	199 813	201 212
КПД брутто	%	61,02	61,17
КПД нетто	%	59,06	59,2

Анализируя полученные результаты, представленные в таблице, можно сделать вывод, что переход на сверхкритические параметры контура высокого давления позволяет увеличить электрическую мощность. Для дальнейших выводов о перспективности применения сверхкритических параметров на ПГУ-КЭС с КУ трех давлений необходимы дополнительные технико-экономические исследования.

Ю.А. Козлова, студ.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

Развитие энергетики СССР и в дальнейшем России проводилось в основном за счет ввода новых мощных паротурбинных агрегатов. Вторым способом повышения экономичности было развитие комбинированного производства тепловой и электрической энергии.

При работе по тепловому графику генерация электрической энергии напрямую зависит от параметров и количества производимой тепловой энергии. Колебания тепловой нагрузки влекут вынужденное изменение электрической мощности. Поскольку невыполнение графика электрической мощности приводит к существенным штрафам (величина штрафа достигает от 100 до 293 % цены мощности, сложившейся при коммерческом отборе мощности [1]), то для обеспечения отпуска электроэнергии агрегаты ТЭЦ вынужденно переводятся в конденсационный режим работы. При увеличении конденсационной выработки происходит рост потребления топлива и, как следствие, себестоимость энергии оказывается выше рыночных ценовых уровней.

Отклонение фактического потребления топлива (газа) от запланированных значений приводит к штрафным санкциям по его оплате (в зимнее время возможно увеличение цены на газ в 1,5 раза).

Повышения тепловой нагрузки также сказываются на эффективности работы ТЭЦ. Так, при росте тепловой нагрузки сохранение объема генерируемой электроэнергии осуществляется за счет увеличения отпуска тепла от редукционно-охладительной установки (РОУ) или пикового водогрейного котла (ПВК). Возможен также выход на балансирующий рынок с собственной инициативой увеличения отпуска электроэнергии.

Наряду с эпизодически возникающими изменениями тепловой нагрузки наблюдаются ее ежесуточные колебания, обусловленные неравномерностью горячего водоснабжения. В течение отопительного сезона такие ежесуточные колебания составляют в среднем

$$\beta = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} = 0{,}85 . \qquad (1)$$

Указанные изменения в нагрузке ТЭЦ не учитываются Правилами оптового рынка электрической энергии (мощности). В таких условиях большинство ТЭЦ становится убыточными, что может стать причиной их закрытия и перехода от комбинированной выработки к раздельной.

Литература

1. **Федеральный** закон об электроэнергетике № 35-ФЗ с изменениями от 5.04.2013 г.

А.А. Константинов, соиск., М.М. Султанов, к.т.н.;
рук. В.С. Кузеванов, д.т.н., проф. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМА СОЗДАНИЯ РЕЖИМНЫХ КАРТ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Для эффективного участия существующих ТЭС на оптовом рынке электроэнергии и мощности предлагается разработка режимной карты турбоустановки с качественной информацией об эффективности планируемых режимов генерации тепла и электроэнергии на ТЭЦ. При этом она будет включать в себя следующую зависимость:

$$B = f(N_э, Q_т), \quad (1)$$

где B — расход топлива; $N_э$ — электрическая нагрузка; $Q_т$ — тепловая нагрузка паротурбинного оборудования.

Оперативное определение расхода топлива (B) для различных режимов работы оборудования ТЭЦ приведены в [1].

В режимной карте будут представлены данные по расходу топлива на текущий момент нагрузки и на перспективу. В общем виде предлагаемая режимная карта будет выглядеть следующим образом (рис. 1).

Параметр	$Q_{т1}$	$Q_{т2}$	$Q_{т3}$	$Q_{тj}$
$N_{э1}$	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{1j}
$N_{э2}$	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{2j}
$N_{э3}$	B_{31}	B_{32}	B_{33}	B_{3j}
$N_{эi}$	B_{i1}	B_{i2}	B_{i3}	B_{ij}

Рис. 1. Режимная карта энергетического оборудования по предлагаемой методике

Действия оператора при принятии решения, используя новую режимную карту, очень просты: фиксация текущего значения расчетного параметра $B_{\text{тек } ij}$; фиксация значений расчетного параметра $B_{\text{нов } ij}$ при переходе в новый режим; реализация перехода на новый режим по формуле $|\Delta B| = \left| B_{\text{тек } ij} - B_{\text{нов } ij} \right|$.

Условия выбора состава действующего оборудования и оптимальное распределение нагрузок между агрегатами согласно предлагаемой методике является простым и удобным в использовании персоналом генерирующих компаний.

Литература

1. **Султанов М.М., Кузеванов В.С.** Разработка и апробация метода оптимизации режимов работы энергетического оборудования ТЭЦ // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 12. С. 24—27.

Е.О. Коробова, студ.; рук. Г.Г. Орлов, к.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

СПОСОБ ПРОХОЖДЕНИЯ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК НА ТЭС ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Суточный график электрических нагрузок является переменным, что приводит к колебаниям значения КПД ТЭС. Одним из способов устранить недостаток и повысить эффективность ТЭС является создание комплекса, состоящего из ТЭС и гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС). Но минусом комплекса является подтопление земель водохранилищем ГАЭС.

Другой способ повышения экономичности ТЭС и ВЭС при сниженной электрической нагрузке в системе и избытке ветровой энергии на ВЭС является способ получения водорода [1] за счет электролиза воды (рис.1).

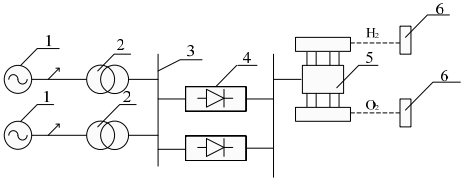


Рис.1. Принципиальная схема получения водорода на ТЭС и ВЭС:
1 — генераторы ТЭС или ВЭС; *2* — трансформаторы; *3* — шины электростанции; *4* — выпрямительный блок; *5* — электролизерная установка; *6* — ресиверы для водорода и кислорода

Полученный водород может быть использован в топливных элементах. Топливные элементы — это электрохимические устройства, которые могут иметь очень высокий коэффициент преобразования химической энергии в электрическую, достигающий 80 %. Как и гальванический элемент, топливный элемент состоит из анода и катода. Между электродами находится электролит. На аноде идет реакция окисления водорода, а на катоде — восстановление кислорода. В топливном элементе происходит суммирование этих реакций с превращением химической энергии в электрическую. Эффективность системы электролизер—топливный элемент можно оценить отношением мощности, затрачиваемой на электролизер $N_{эл\text{-}р}$, к мощности, которую можно снять с батареи топливных элементов $N_{т.эл}$. Величина эффективности будет зависеть от КПД топливного элемента и лежит в пределах от 0,367 до 0,46.

Достоинством топливных элементов является то, что они легки, имеют небольшие размеры, производят мало шума, имеют небольшой нагрев и более эффективны с точки зрения потребления топлива по сравнению с традиционными установками получения электрической энергии.

Литература

1. **Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И.** Экология использования возобновляющихся энергоисточников. СПб.: Издательство Ленинградского университета, 1991. — С. 343.

А.С. Кромова, студ.; рук. Г.В. Ледуховский, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЭС ПРИ РАЗРАБОТКЕ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

При разработке схем теплоснабжения городов одним из наиболее трудоемких этапов является разработка перспективных топливных балансов. Для ТЭС эта задача решается на основе нормативно-технической документации по топливоиспользованию, включающей энергетические характеристики оборудования и макет расчета номинальных показателей его тепловой экономичности. Однако прямое использование указанного макета для прогнозирования технико-экономических показателей (ТЭП) при изменении отпуска тепла потребителям, состава работающего оборудования, параметров окружающей среды и т.п. невозможно либо сопряжено с такими допущениями, которые приводят к появлению существенных ошибок.

Нами разработан общий алгоритм прогнозирования ТЭП оборудования ТЭС, который учитывает фактически достигнутые показатели тепловой экономичности за базовый период. Алгоритм включает модули расчета показателей турбоагрегатов, энергетических и водогрейных котлов, собственных нужд. Каждый модуль имеет сходную структуру. Например, для турбоагрегатов после задания фактических показателей работы оборудования в базовом периоде определяются исходно-номинальные значения удельных расходов тепла брутто на выработку электроэнергии, а также известные поправки к ним на отклонение фактических показателей от исходно-номинальных. Остаток невязки фактических и номинальных (исходно-номинальных с поправками) значений удельного расхода тепла брутто на выработку электроэнергии отражает резерв тепловой экономичности. Далее, при изменении нагрузок агрегатов, температуры сетевой воды и пр. определяются новые значения давлений пара в камерах регулируемых отборов, расходы пара по проточной части. Вычисляются новые исходно-номинальные значения удельных расходов тепла брутто на выработку электроэнергии и новые поправки к ним. Определенный ранее резерв тепловой экономичности суммируется с комплексом поправок. Таким образом, алгоритм позволяет учитывать фактически достигнутые показатели тепловой экономичности и, что важно, при отсутствии изменений всегда возвращает показатели работы оборудования в базовом периоде. Энергетические характеристики оборудования конкретной ТЭС подключаются к алгоритму после их оцифровки. Алгоритм полностью автоматизирован.

Алгоритм успешно использован при разработке перспективных топливных балансов более чем десяти ТЭЦ России.

М.А. Крыленко, асп.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАКОВ-АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛА НА ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РЫНКА

При работе по тепловому графику электрическая мощность генерирующего оборудования ТЭЦ определяется величиной и параметрами отпуска тепловой энергии. В условиях рыночных отношений формирование цены на электроэнергию определяется величиной спроса и предложения. Под влиянием противоречий спроса на тепло и электроэнергию экономическая эффективность работы ТЭЦ может существенно снижаться, что в некоторых случаях приводит к работе станции с существенными убытками.

Для повышения экономической эффективности работы ТЭЦ можно осуществлять разгрузку оборудования ТЭЦ с передачей тепловой нагрузки на пиковые источники, например пиковые водогрейные котлы (ПВК). Этот режим возможен только при наличии свободной пиковой мощности ПВК, кроме того, это приводит к снижению экономичности работы ТЭЦ в течение суток.

В этих условиях использование баков-аккумуляторов (БА) на ТЭЦ позволит снизить зависимость эффективности работы станции от противоречий спроса на тепло и электроэнергию. В отличие от предыдущих способов использования аккумулирования тепла [1] в условиях рынка режим работы баков аккумуляторов меняется. В этом случае целесообразно, наоборот, зарядку БА проводить в дневные часы, увеличивая тепловую нагрузку ТЭЦ, это позволяет увеличить выработку электроэнергии на тепловом потреблении и повысить эффективность работы оборудования ТЭЦ в дневные часы, когда спрос на электроэнергию высокий и цены на рынке достигают максимальных значений. В ночные часы, когда цены минимальны, проводится разрядка БА, при этом тепловая нагрузка отборов уменьшается и электрическая мощность снижается. Принцип работы аккумулятора в течение суток представлен на рис.1. Предварительные расчеты, показывают, что установка баков аккумуляторов с таким режимом работы окупается в течение 5—6 лет.



Рис. 1. Характер изменения цен электроэнергии на РСВ

Литература

1. **Глюза А.Т.** Аккумулирование теплоты в тепловых сетях и повышение маневренности энергоисточников системы теплоснабжения. М.: Информэнерго, 1989.

К.Е. Кузина, студ.; рук. Е.В. Макаревич, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ ТЭС

Целью работы является исследование различных методик расчета себестоимости продукции, применяемых как в России, так и за рубежом (табл.1). Структура себестоимости для энергетических производств отличается от структуры себестоимости для промышленности и различна для отдельных типов энергетических установок. Так, на ТЭС и котельной наибольшие затраты приходятся на топливо, на предприятиях тепловых сетей — на амортизационные отчисления. Для каждого типа производства структура зависит от мощности, типа оборудования и масштаба производства [1].

Таблица 1

Основные методики расчета себестоимости продукции ТЭС

Российские методики	Зарубежные методики
Физический метод	Метод ABC (Activity Based Costing) (США)
Эксергетический метод	Система точно вовремя (Just In Time) (Япония)
Метод ОРГРЭС (пропорциональный)	ТАРГЕТ-костинг (Target Costing) (Япония)
Метод КПД отбора	Стандарт-костинг — США

Сложность расчета себестоимости для ТЭЦ состоит в том, что для каждого вида продукции требуется выделить показатели эффективности отдельно, хотя производятся они совместно в одном агрегате. На практике не используют единую меру качества вырабатываемых ТЭЦ продуктов — электроэнергии и отпускаемой потребителям теплоты, что не дает возможности точно определить дифференцированные расходы топлива на них, это значительно сказывается на конкурентоспособности ТЭЦ при выходе на рынок электроэнергии и мощности.

Литература

1. **Суворов Д.М.** Анализ различных методов распределения затрат теплоты топлива при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии // Сб. научн. тр. SWorld : Материалы Международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ‘2012». Выпуск 3. Том 10. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. — С. 50—56.

А.О. Марков, студ.; рук. Г.Г. Орлов, к.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭС»

Добиться повышения качества технологической и конструктивной проработки оборудования при одновременном сокращении сроков проектирования можно за счет использования компьютерных систем автоматизированного проектирования. С этой целью нами был разработан программный комплекс «Расчет тепловых схем ТЭС». В этом комплексе расчет ведется в диалоговом режиме в отличие от большинства существующих программ по расчету тепловых схем ТЭС. Определение параметров пара и воды было осуществлено по упрощенным уравнениям для воды и пара [1].

Программный комплекс состоит из восьми отдельных модулей (подпрограмм), позволяющих как по модульно, так и целостно проводить расчет тепловой схемы ТЭС. В настоящее время реализованы пять модулей: построение процесса расширения пара в главной и приводных турбинах в энергетических диаграммах (*T,s*- и *h,s*-); определение величины подпитки цикла и баланс пара и воды в схеме ТЭС; определение параметров пара и воды, а также расходов пара на каждый ПВД, приводную турбину питательного насоса блока; определение величины подпитки теплосети и расчет деаэратора теплосети; определение величин расходов пара на сетевые подогреватели и параметров сетевой воды.

Результаты расчета выводятся на экран дисплея, где представлен рассчитываемый участок тепловой схемы. Это позволяет наглядно видеть как рассчитываемый в данный момент параметр рабочего вещества, так и сам участок тепловой схемы. Результаты могут сохраняться на диске как информация в виде таблиц параметров пара, воды и расходов рабочего вещества, а также выдаваться на печать или передаваться по почте. В связи с тем, что в тепловых схемах паротурбинных ТЭС могут применяться как барабанные, так и прямоточные котлы, система позволяет определить термодинамические параметры и расходы рабочего вещества с учетом типа котла, наличия или отсутствия промежуточного перегрева пара, а также назначения электростанции (КЭС, ТЭЦ).

Программа рассчитана на применение в учебном процессе при выполнении курсового и дипломного проектирования, а также для проведения научно-исследовательских работ на этапе оптимизации.

Литература

1. **Литинецкий В.В., Ривкин С.Л., Кремневская Е.А.** Алгоритм расчета термодинамических свойств водяного пара на ЭВМ // Теплоэнергетика. 1986. № 3. С. 48—50.

Г.Ю. Михайлов, Е.Е. Тютина, студенты;
рук. Г.В. Ледуховский, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

СИСТЕМА РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ РЕЗЕРВА ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТУРБОАГРЕГАТОВ К-210-130 СУРГУТСКОЙ ГРЭС-1

Система технической отчетности ТЭС построена на ежемесячном определении номинальных и фактических показателей работы оборудования. Под номинальным уровнем экономичности понимается достижимый на практике максимум показателей тепловой экономичности. Номинальные показатели определяются в соответствии с макетом расчета номинальных показателей (макетом) с использованием комплекта энергетических характеристик оборудования (ЭХ). Макет представляет собой алгоритм, обеспечивающий расчет номинальных показателей работы оборудования, в качестве исходных данных для которого используются фактические показатели. Макет и комплект ЭХ входят в состав нормативно-технической документации по топливоиспользованию электростанции.

Фактический расход топлива обычно отличается от номинального, т.е. возможен либо перерасход топлива относительно номинального значения, либо его экономия. То и другое называется резервом тепловой экономичности (РТЭ). Положительный РТЭ — это перерасход топлива; отрицательный РТЭ — это экономия топлива. РТЭ является следствием отклонения тех или иных фактических показателей работы оборудования от номинальных значений, что отражают составляющие РТЭ.

В настоящей работе приведен пример разработки автоматизированного алгоритма, обеспечивающего получение количественных данных об экономичности работы турбоагрегатов К-210-130 Сургутской ГРЭС-1. В ходе работы макет представлен в виде автоматизированного файла MS Excel, при этом все необходимые графики энергетических характеристик турбоагрегатов переведены в электронный вид (оцифрованы) с использованием разработанного в ИГЭУ программного обеспечения (отклонение результата расчета от графического оригинала — менее 0,1 %), и подключены к расчету в виде функций средствами Visual Basic. Блок исходных данных сформирован так, чтобы обеспечить возможность расчета не только номинальных показателей работы турбоагрегатов, но и составляющих РТЭ.

В результате получен полностью автоматизированный алгоритм, позволяющий после ввода исходных данных — фактических показателей работы турбоагрегатов, усредненных, например, за оперативную смену, получить значения общего РТЭ и составляющих РТЭ по каждому турбоагрегату. На базе такого автоматизированного расчета может быть разработана система стимулирования персонала (анализа эффективности работы вахт).

Я.В. Молдованов, студ.; А. Д. Грига, д.т.н., проф.
(филиал МЭИ в г. Волжском)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРОВИНТОВЫХ МАШИН НА ТЭЦ

Вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности в современных условиях экономического развития уделяется повышенное внимание. Один из способов повышения энергоэффективности — это использование (ПВМ) на ТЭЦ.

Преимущества винтовой турбины по сравнению с обычной лопаточной турбиной:

- высокий внутренний относительный КПД (порядка 67—70 %) в широком диапазоне нагрузок;
- высокая эксплуатационная надежность при использовании пара любого качества, в том числе высоковлажного с которыми использование лопаточных турбин невозможно;
- высокая динамика и управляемость: мощность до номинальной набирается за 10 с;
- допустимы частые остановы турбины, вызванные производственной необходимостью.

ПВМ позволяют заменить различные РОУ и БРОУ, которые дросселирует пар, при этом выбрасывая огромную потенциальную энергию в атмосферу.

Я предлагаю также схему использования ПВМ взамен расширителей продувок на энергетических котлах. Это позволит нам повысить энергоэффективность ТЭС за счет использования пара продувок. В настоящее время пар на непрерывную продувку, поступающий от котла с высокими параметрами, дросселируется в расширителях до рабочих параметров. Например, для котла ТГМ-84 с давлением в барабане 140—150 кг/см^2 расход пара на расширитель непрерывной продувки составляет 3—10 т/ч, в котором пар дросселировался до параметров 6 и 1,2 кг/см^2 для использования его на деаэраторах. Также на паровинтовую машину можно завести и другие потоки пара, что позволит нам увеличить расход пара через сечение турбины и соответственно увеличить выработку электричества и получить пар на выходе необходимых нам параметров.

Выработка электрической энергии происходит за счет использования высокопотенциальной энергии пара. Такой вариант реконструкции котельных цехов позволит сократить собственные нужды в электрической энергии (себестоимость собственной выработанной электрической энергии составляет 30 коп/(кВт·ч)), сократить расходы на приобретение сетевой электроэнергии, снизить себестоимость произведенной тепловой энергии и получить дополнительную прибыль, что значительно повышает эффективность котельных и является энергосберегающим решением.

Е.Н. Олейникова, асп.; рук-ли А.А. Дудолин, к.т.н., доц.,
В.Д. Буров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕГИОНОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПГУ-ТЭЦ С ТНУ

Использование низкопотенциальных источников теплоты (ИНТ) энергообъекта за счет теплонасосных установок (ТНУ) позволяет получать дополнительную тепловую мощность для отпуска потребителю либо для собственных нужд. Данный эффект особенно важен в тех случаях, когда на площадке энергообъекта происходит замена паросилового оборудования на парогазовое, приводящее к снижению отпуска тепловой мощности. В исследовании рассматривается использование ТНУ для выработки дополнительной тепловой мощности в составе ПГУ-110Т на базе газовой турбины GE 6111FA. По планам развития электроэнергетики на период до 2030 г. планируется ввод до 100 энергоблоков теплофикационных ПГУ 110 МВт на базе данных турбин при реконструкции действующих и строительстве новых ТЭЦ. Моделирование осуществлено в программном продукте Thermoflex разработки компании Thermoflow. Расчет тепловых схем проведен для климатических условий трех регионов России (цифры в скобках соответствуют тепловому графику и среднеотопительной температуре окружающей среды): Центр (150/70 °С, –2,2 °С), Урал (150/70 °С, –5,4 °С), Юг (110/70 °С, 6,6 °С). Критерием сравнения является расход топлива по системному эффекту, КПД замещающей КЭС принят равным 51 %, котельной — 90 %. В схемах используется парокомпрессионные электроприводные ТНУ на бутане, ИНТ-циркуляционная вода конденсатора паровой турбины.



Рис. 1. Относительное изменение доли собственных нужд и отпуска тепловой мощности от ПГУ-110Т в сравнении с вариантом схемы без ТНУ

Использование электроприводных ТНУ приводит к увеличению доли собственных нужд энергоблока и возрастанию отпуска тепловой мощности в режиме при среднеотопительной температуре окружающей среды до 47 % в зависимости от региона (см. рис. 1). При этом для схем с ТНУ наблюдается снижение расхода топлива в сравнении с вариантами без ТНУ: для климатических условий Центра — в 2,91, для Урала — в 2,33, для Юга — в 2,41 раза.

А.Ю. Панамарева, асп.; рук. А.А. Кудинов, д.т.н., проф.
(СамГТУ, г. Самара)

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В настоящее время развитие мировой энергетики связано с внедрением газотурбинных и парогазовых технологий на тепловых электрических станциях. Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной правительством РФ 13 ноября 2009 года, планируется ввести в эксплуатацию более 80 ПГУ. При этом значительное внимание удаляется прогрессивным технологиям сжигания топлива в камерах сгорания ГТУ и улучшению экологических показателей установок. В ГТУ сжигаются специальные виды газообразных и жидких топлив [1, 3]. Актуальной задачей при работе ГТУ является оперативный (аварийный) перевод газовой турбины на сжигание жидкого вида топлива при изначальном сжигании газа. Выполнение анализа влияния состава жидкого и газообразного топлива на показатели работы энергетической ГТУ, работающей в цикле парогазовой установки, является актуальной.

Теоретические и экспериментальные исследования влияния состава топлива на эффективность работы ГТУ выполняются на базе ГТУ производства фирмы «General Electric» типа PG6111 FA мощностью 76 МВт, установленной на Новокуйбышевской ТЭЦ-1. Цель работы заключается в получении экспериментальных данных и в разработке методики расчета камеры сгорания ГТУ с учетом изменения состава топлива. Методика представляет собой автоматизированную программу для ЭВМ, с помощью которой проводится расчет технических показателей работы ГТУ, которые зависят от конкретного состава топлива [2]. Таким образом, появляется возможность оперативно прогнозировать эксплуатационные особенности ГТУ, установленной на Новокуйбышевской ТЭЦ-1, проводить режимные настройки работы газовой турбины в зависимости от сжигаемого топлива, получать данные показателей эффективности работы ГТУ на различных видах газообразного и жидкого топлива.

Литература

1. **Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П.** Тепловые электрические станции. М.: Издательство МЭИ, 2005.

2. **Кудинов А.А.** Парогазовые установки тепловых электрических станций. Самара: Издательство СамГТУ, 2009.

3. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательство МЭИ, 2002.

Е.А. Скрипин, студ.; рук. Г.И. Шамшурина, ст. преп.
(СамГТУ, г. Самара)

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЯДА УСТАНОВОК ВАКУУМНО-КАВИТАЦИОННОЙ ДЕАЭРАЦИИ

Деаэраторы перегретой воды имеют ряд серьезных преимуществ перед деаэраторами — подогревателями, которым присущи сложность конструкции, недостаточно высокая надежность глубокой деаэрации в переменных режимах. В деаэраторах перегретой воды наиболее уязвимыми являются устройства распыливания воды. На кафедре ТЭС Самарского государственного технического университета разработан деаэратор перегретой воды, в котором высокая интенсивность процесса десорбции и большая глубина деаэрации (до 10 мкг/дм^3) достигается за счет применения специального кавитационно-разгонного устройства, где образуется двухфазный пароводяной поток, движущийся со сверхзвуковой скоростью [1]. На Центральной отопительной котельной Самарской ГРЭС была создана экспериментальная установка, включенная в технологическую схему деаэратора ст. № 2, а затем и опытно-промышленная установка на баке-аккумуляторе деаэратора ст. № 4 [2, 3]. Данные экспериментов и анализ результатов промышленной эксплуатации вакуумно-кавитационных деаэраторов в течение нескольких лет показали надежность и эффективность их работы. Результаты исследований явились основой для расчетов характеристик вакуумно-кавитационных деаэраторов.

Разработана методика расчета теплового режима вакуумно-кавитационного деаэратора и поперечных размеров кавитационно-разгонного устройства.

Рассчитаны характеристики тепловых режимов деаэраторов заданного параметрического ряда: $D_в$ = 20; 35; 100; 175 т/ч при давлении в деаэраторах p = 0,0147; 0,0294; 0,049 МПа.

По этим характеристикам рассчитано и подобрано вспомогательное оборудование (охладители выпора, эжекторы, смешивающие подогреватели), что позволяет проводить комплектацию деаэрационных установок.

Литература

1. **Авторское свидетельство № 635045**. Деаэратор перегретой воды / В.Д. Муравьев, В.Б. Черепанов, Г.И. Дельцова (Шамшурина). № 44, 30.11.1978 г.

2. **Кудинов А.А., Шамшурина Г.И., Борисова Н.В.** Разработка и исследование опытного вакуумного деаэратора // Энергетик. 2009. № 10. С. 29—31.

3. **Исследование** режимов работы вауумно-кавитационных деаэраторов Самарской ГРЭС / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Н.В. Борисова, Г.И. Шамшурина // Электрические станции. 2011. № 2. С. 38—42.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОЙ РАЗГРУЗКИ ПАРОГАЗОВОГО ЭНЕРГОБЛОКА

Известно, что нижняя граница регулировочного диапазона нагрузок парогазового энергоблока определяется снижением надежности работы оборудования ПТУ при снижении параметров острого пара из-за уменьшения температуры выхлопных газов газовой турбины, а также ухудшением экологических характеристик блока при работе на пониженных нагрузках с более высоким значением коэффициента избытка воздуха в камере сгорания ГТУ.

В работе проведена расчетная оценка возможности глубокой разгрузки энергоблока ПГУ на основе ГТУ SGT5-4000F (Siemens AG) мощностью 277,2 МВт за счет перепуска части сжатого в компрессоре воздуха на его вход при имеющихся в настоящее время ограничениях: регулировании расхода воздуха закрытием входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора при сохранении постоянной температуры газов за турбиной вплоть до полного закрытия ВНА. В основу расчетной модели ГТУ положены уравнения сохранения энергии и массы, а также экспериментальные характеристики, полученные при статистической обработке результатов испытаний ГТУ SGT5-4000F, работающей на Невинномысской ГРЭС в широком диапазоне изменения климатических условий и углов установки ВНА компрессора.

В результате проведенных расчетов установлено, что при полном закрытии ВНА коэффициент избытка воздуха достигает предельного значения ($\alpha_{кс} \approx 3{,}4$) по условиям обеспечения концентрации вредных примесей в уходящих газах на требуемом уровне. Дальнейшее снижение нагрузки энергоблока ПГУ можно осуществить за счет сброса части сжатого в компрессоре ГТУ воздуха на его вход с поддержанием $\alpha_{кс}$ на допустимом уровне вплоть до значения электрической мощности, соответствующего значению максимально-допустимой температуры газов на выхлопе ГТУ (около 600 °С), ограничиваемой по условиям обеспечения допустимого температурного режима металла ППВД КУ. Так, при температуре наружного воздуха, равной –15 °С, 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 °С расширение регулировочного диапазона ПГУ возможно, но в меньшей степени. Увеличение расхода перепускаемого воздуха при понижении температуры наружного воздуха приводит к снижению КПД ГТУ и при температуре, равной –15°С, составляет 5,7 %.

П.А. Тидеман, асп.; рук. В.С. Агабабов, д.т.н., проф. (ОАО «ВТИ»)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПГУ С ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА И ХОЛОДА

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития отечественной электроэнергетики являются парогазовые технологии, позволяющие значительно повысить КПД тепловых электрических станций по выработке электроэнергии по сравнению с традиционными паротурбинными технологиями. Учитывая климатические условия Российской Федерации, а также прогнозы спроса на теплоту, необходимо разрабатывать научно-технологические решения, обеспечивающие дополнительную выработку теплоты при эксплуатации парогазовых установок (ПГУ). Кроме того, довольно часто потребители продукции ТЭЦ и инфраструктура ТЭЦ нуждаются в холоде. На сегодняшний день холод на электростанциях не производится, что ограничивает сферу потенциальных потребителей продукции ТЭЦ. Для решения данной проблемы предлагается установка, которая представляет собой тепловой насос парокомпрессионного типа в сочетании с парогазовой установкой и позволяет одновременно генерировать тепло и холод. Отличительной особенностью установки является то, что для генерации тепла и холода используется один тепловой насос.

Принципиальная схема установки на базе ПГУ конденсационного типа с парокомпрессионной теплонасосной установкой для одновременного получения тепла и холода представлена в статье [1].

При проведении расчетных исследований термодинамической эффективности эксергетический КПД ПГУ-КЭС с ПТНУ при принятых условиях расчета составляет 44,60—51,10 %. Коэффициент использования теплоты топлива принимает значения 46,27—49,29 % [2]. Преимуществом этой установки является возможность выработки холода как в теплый, так и холодный период года с температурами до –25 °С.

Литература

1. **Агабабов В.С., Смирнова У.И., Тидеман П.А.** Разработка схем высокоэффективных парогазовых ТЭС с системой одновременного производства тепла и холода // Новое в российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2013. № 8.

2. **Влияние** температуры наружного воздуха на термодинамическую эффективность ПГУ с установкой для одновременной генерации тепла и холода / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.А. Тидеман и др. // Новое в российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2013. № 10.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

В настоящее время поиск путей по снижению энергопотребления существующих зданий как за счет их реконструкции, так и привлечения новых нетрадиционных источников энергии весьма актуален. Особый интерес представляют решения, позволяющие оптимизировать систему теплоснабжения зданий, так как именно на отопление и горячее водоснабжение тратится большая часть потребляемой энергии.

Несмотря на то, что централизованное теплоснабжение от ТЭЦ остается самым энергетически эффективным способом использования энергии топлива, крайне важен опыт реконструкции системы теплоснабжения существующего здания, присоединенного к тепловой сети, с возможностью полного от нее отключения и использования тепловых насосов. При этом экономится не только электроэнергия, но и уголь, газ и нефтепродукты. Отопление тепловыми насосами в 4 раза экономичней отопления электричеством [1].

Тепловой насос можно использовать практически в любых теплотехнологиях, но не всегда это дает необходимый экономический эффект. Это зависит от ряда факторов, таких как мощность низкопотенциального источника, разность температур в испарителе и конденсаторе ТНУ, цена на электроэнергию в регионе [2].

Для исследования эффективности работы теплового насоса в различных режимах была разработана экспериментальная установка на базе поршневых компрессоров от БК1500 и БК2500, работающих на R22.

В результате проведенных исследований по режимам работы ТНУ получены следующие выводы:

- разработан экспериментальный стенд для исследования работы теплового насоса;

- проведен графоаналитический анализ зависимости коэффициента СОР и мощности ТНУ от температур конденсации и кипения;

- получены аналитические зависимости суммарного потребления электрической энергии и потребляемое тепловым насосом электричество.

Литература

1. **ЭСКО** // Электронный журнал электросерверной компании «Экологические системы» 2010. № 7. http://esco-ecosys.narod.ru/2010_7/art173.htm

2. **Касымов А.Б.** Повышение тепловой эффективности ТЭС на основе использования инновационных энергосберегающих технологий: Дис. … канд. техн. наук, 2012.

М.С. Томашевская, студ.; рук. Е.Н. Потапкина, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭС РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Сегодня в мире наметилась тенденция, получившая название «ядерный ренессанс». В перспективе к 2030 году на планете будет эксплуатироваться до 500 атомных энергоблоков (сейчас их насчитывается 435). Больше всего атомных электрических станций (АЭС) эксплуатируется в США(63 АЭС, 104 энергоблока). В России эксплуатируется 10 АЭС (33 энергоблока) [1, 2].

Главное отличие АЭС от ТЭС на органическом топливе состоит в использовании ядерного горючего, которое получают из природного урана. В настоящее время в России эксплуатируются как реакторы РБМК, так и ВВЭР [3].

Главным преимуществом АЭС перед любыми другими электростанциями является их практическая независимость от источников топлива, т.е. удаленности от месторождений урана и радиохимических заводов. Для большинства стран, в том числе и России, производство электроэнергии на АЭС не дороже, чем на пылеугольных и тем более газомазутных ТЭС. Затраты на строительство АЭС находятся примерно на таком же уровне, как и на строительство пылеугольных ТЭС или несколько выше. Огромным преимуществом АЭС является ее относительная экологическая чистота.

Главный недостаток АЭС — тяжелые последствия аварий в реакторном отделении с его разгерметизацией и выбросом радиоактивных веществ в атмосферу с заражением пространств. Для обеспечения радиоактивной безопасности АЭС оборудуют специальной приточно-вытяжной системой вентиляции, сложность которой не идет ни в какое сравнение с вентиляционной системой ТЭС. Серьезной проблемой для АЭС является их ликвидация после выработки ресурса, которая по оценкам может составлять до 20 % стоимости их строительства [4].

Литература

1. **Шматко С.И.** Участие российских компаний в международных проектах по строительству АЭС, 2007.

2. **Щедровицкий П.Г.** Основные направления стратегического развития атомной энергетики, 2007.

3. **Тевлин С.А.** Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000. М.: Издательство МЭИ, 2002.

4. **Маргулова Т.Х.** Атомные электрические станции. М.: ИздАТ, 1994.

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПАРОГАЗОВОГО БЛОКА ПГУ-420 НА НК ТЭЦ-1

Развитие энергетики Российской Федерации до недавнего времени осуществлялось в основном путем ввода новых паротурбинных агрегатов. Акцент при этом ставился на повышение начальных параметров и единичной мощности установки. Это позволило заметно понизить удельный расход топлива на единицу выработанной электрической энергии. Однако в настоящее время большинство ТЭЦ с существующим оборудованием морально и физически устарело [1]. При этом оборудование ТЭЦ РФ работает на средних и высоких параметрах водяного пара. Данную проблему можно решить повышением параметров пара в паротурбинном цикле или заменой существующего оборудования на парогазовую установку [2, 3].

С целью сравнения энергетической эффективности различных вариантов ПГУ применительно к конкретной тепловой электрической станции (в данном случае к НК ТЭЦ-1) предлагается провести расчет блока ПГУ электрической мощностью 300…450 МВт. В качестве проекта в настоящей работе рассматривается отечественная парогазовая установка ПГУ-420, состоящая из двух газотурбинных установок ГТЭ-115М, двух котлов-утилизаторов П-87М и одной паротурбинной установки КТ-150-8. Расчет выполнен по методике, изложенной в [4].

Анализ результатов расчетов показал, что коэффициент полезного действия ПГУ-420 равен 55,2 %, удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии — 0,222 кг усл. т/(кВ·ч). При этом выработка электрической энергии в ПГУ составит 2416,8 млн кВт·ч/год, а тепловой энергии — 423,35 млн кВт·ч/год. Простой срок окупаемости расширения Новокуйбышевской ТЭЦ-1 ПГУ-420 составит 6 лет и 2,5 месяца, а дисконтированный — 9 лет.

Литература

1. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. М.: ИНФРА-М, 2013. — 325 с.

2. **Кудинов А.А.** Парогазовые установки тепловых электрических станций: учебное пособие. Самара: СамГТУ, 2009. — 115 с.

3. **Анализ** направлений развития отечественной энергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шелыгин, В.С. Рабенко. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. — 256 с.

4. **Денисов И.Н.** Расчет принципиальной тепловой схемы парогазовой установки с котлом-утилизатором: учебно-методическое пособие. Самара: СамГТУ, 2007. — 85 с.

Секция 47

КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент С.В. Мезин
Секретарь секции — ассистент Ю.С. Бурцева

А.Р. Абдрахимов, студ.; рук. А.Н. Черняев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНЕТРОНА В КАЧЕСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Электрические водогрейные котлы широко применяются в частных домах и коттеджах. Основным нагревательным элементом в современных электрических котлах является трубчатый электронагреватель (ТЭН). Основное достоинство применения ТЭН — цена, при этом существуют некоторые недостатки:

- ТЭН являются неремонтируемыми и невосстанавливаемыми элементами;

- общая коррозия металлов внутри ТЭН вследствие того, что электроизоляционный наполнитель в процессе эксплуатации приходит во взаимодействие со сплавом сопротивления и металлом оболочки;

- образующаяся на поверхности ТЭН накипь, а также нерастворимый в воде осадок резко ухудшают теплопроводность металла, что приводит к перегреву ТЭН вплоть до его поломки;

- значительное увеличение потребления электроэнергии связанное с появлением накипи; при толщине слоя накипи 4 мм расход электроэнергии увеличивается на 36 %.

Данные проблемы решаются путем замены ТЭН на магнетрон. Магнетрон — прибор для генерации электромагнитных колебаний СВЧ. Магнетрон не требует погружения в воду. Монтаж выполняется так же легко, как и монтаж ТЭН. Магнетрон обладает высоким КПД, который практически равен КПД ТЭН.

Результаты опыта с нагревом 1,5 л воды в микроволной печи (магнетрон) и чайнике (ТЭН) показали, что при мощности микроволновой печи 1275 Вт и чайника 2400 Вт время нагрева составило 332 и 177 с соответственно. Потраченная энергия составила 423,3 кДж в микроволновой печи и 424,8 кДж в чайнике. Опыт показал, что затраты энергии практически одинаковые. Цена ТЭН и магнетрона также одинакова.

Отсутствие недостатков, присущих ТЭН, при использовании магнетрона для нагрева воды в водогрейных и отопительных котлах позволяет при равных цене и потреблении энергии предположить целесообразность модернизации последних. Для окончательного вывода о возможности модернизации необходимо более тщательное исследование, проведение расчетов и экспериментов.

А.С. Алмаева, студ.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ШАРИКОВОЙ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТОРОВ ТЭС И АЭС

Опыт эксплуатации конденсаторов ТЭС и АЭС показывает, что экономичность работы станции и эффективность выработки электроэнергии напрямую зависит от состояния поверхностей охлаждения конденсатора. Независимо от источника охлаждающая вода содержит неорганические соединения и биоорганизмы, осаждающиеся на поверхностях трубок конденсатора и значительно ухудшающие теплообменные свойства агрегата и вакуум в нем [1]. Наиболее эффективным признано применение системы шариковой очистки (СШО), позволяющее добиться повышения выработки электроэнергии более чем на 2 % при сохранении расхода топлива [2].

Цель работы состоит в разработке динамических моделей подсистем предварительной очистки и циркуляции шариков для последующего решения задачи ее автоматизации [3].

Создана комплексная математическая модель, позволяющая воспроизводить в динамике процессы в СШО. Она содержит модели фильтра предварительной очистки и системы управления им, связанные в единый программный комплекс, было проведено моделирование процесса загрязнения и отмывки фильтра, в различных режимах. Результаты позволили выбрать оптимальный алгоритм управления фильтром, обеспечивающий своевременное включение режима его отмывки. Была создана модель истирания шариков при различных режимах работы СШО, был выработан алгоритм расчета оптимального срока замены шариков. В комплексе данные исследования могут повысить общую надежность и экономичность установки.

Для реализации предлагаемых алгоритмов управления автором разработаны варианты АСУТП СШО на базе ПТК «Саргон».

Данная система была сымитирована и испытана на базе программного обеспечения ПТК «Саргон». Предварительные результаты подтвердили эффективность повышения экономичности системы.

Литература

1. **Блюдов В.П.** Конденсационные устройства паровых турбин. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951.

2. **Тумановский А.Г., Иванов Ю.Г.** Эффективность использования системы шариковой очистки конденсатора паровой турбины. // Новости теплоснабжения. 2011. № 7.

3. **Кузьминский В.П., Кухарь В.Ю.** Опыт освоения и эксплуатации отечественной системы шариковой очистки конденсаторов паровых турбин на ТЭС // Энергосбережение. 2007. № 3. С. 12—16.

И.А. Болдинов, студ.; рук. Г.П. Плетнев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

НАСТРОЙКА МНОГОКОНТУРНЫХ АСР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ

Для стабилизации инерционных параметров на отечественных энергоблоках широкое распространение получила так называемая система регулирования со сложным дифференциатором [1], основанием к которой послужил метод компенсированной настройки внешнего контура [2]. За время ее применения был проведен ряд исследований, направленных на выработку методологии настройки схемы, однако данный вопрос по-прежнему остается актуальным. В настоящей работе была проведена формализация исходного метода расчета параметров настройки сложного дифференциатора на заданный запас устойчивости по корневому показателю.

Расчет настроек регулятора в данной схеме проводится на опережающий участок в соответствии с известными методами настройки одноконтурных АСР [3]. Выбор передаточной функции дифференциатора осуществляется таким образом, чтобы скомпенсировать динамику инерционного участка объекта. Такое действие дает гарантированный запас устойчивости внешнего контура, не меньший запаса устойчивости внутреннего. После этого осуществляется построение границы запаса устойчивости внешнего контура в плоскости коэффициентов передачи внешнего и внутреннего контуров. Далее, по найденному ранее значению коэффициента передачи регулятора определяется коэффициент передачи сложного дифференциатора, обеспечивающий минимум принятого интегрально критерия при ограничении в виде неравенства на заданный запас устойчивости.

Используя такой подход, методику можно легко обобщить на произвольное число контуров. Получены выражения для расчета кривой заданного запаса устойчивости *i*-го контура.

Предложенный метод обеспечивает простоту расчета, а также инвариантность относительно выбора моделей инерционных участков объекта.

Литература

1. **Биленко В.А., Шавочкин И.А.** Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2006. № 4.

2. **Миронов В.Д.** Регулирование с опережающим импульсом // Изв. ВТИ. 1948. № 8.

3. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2008.

И.А. Болдинов, студ.; рук. Г.П. Плетнев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ АСР СО СЛОЖНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

Применение сложных дифференциаторов [1] позволяет облегчить этап наладки и ввода многоконтурной системы регулирования в эксплуатацию, однако дальнейшее ее поддержание в работе также требует обслуживания. Для автоматизации этой процедуры широко применяются различные алгоритмы адаптации. На основании анализа частотных свойств двухконтурной системы регулирования со сложным дифференциатором предлагается модификация алгоритма автоматизированной настройки, описанного в [2].

Алгоритм предполагает идентификацию инерционного участка по одной точке комплексной плоскости при помощи генератора синусоидальных колебаний (ГСК). Для расчета нового приближения коэффициента передачи сложного дифференциатора проводится вычисление вектора КЧХ разомкнутой системы с последующей аппроксимацией его упрощенным оператором вида

$$W_{\text{р.с.экв}}(s) = \frac{K_{\text{экв}}\, e^{-c\cdot Ts}}{Ts(aT^2s^2 + bTs + 1)},$$

где a, b, c — фиксированные коэффициенты, выбор которых осуществляется на основании априорной информации о предполагаемом соотношении инерционности основного и опережающего каналов объекта. Здесь коэффициент $K_{\text{экв}}$ линейно связан с коэффициентом передачи разомкнутой системы, что позволяет организовать итерационную процедуру следующего вида

$$K_{\text{д}i+1} = \frac{K_{\text{экв}i}}{K_{\text{экв}}^{\text{опт}}}\, K_{\text{д}i}, \quad T_{\text{д}i+1} = T_{\text{мод}i+1}, \quad \omega_{\text{г}i+1} = \frac{(T\omega)_{\text{опт}}^{\text{рез}}}{(T\omega)_{i+1}}\omega_{\text{г}i},$$

где $K_{\text{мод}}$ и $T_{\text{мод}}$ — коэффициент передачи и постоянная времени модели инерционного участка. Критерием окончания настройки является близость параметров настройки текущей и предыдущей итераций. Предложенный итерационный алгоритм обладает хорошей сходимостью и применим для широкого диапазона объектов.

Литература

1. **Биленко В.А., Шавочкин И.А.** Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2006. № 4.

2. **Ротач В.Я., Кузищин В.Ф., Клюев А.С.** Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1984.

В.А. Боченков, студ.; рук. Е.И. Мерзликина, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ВЫБРАННОЙ МОДЕЛИ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ АСР

Одним из основных этапов создания АСР является выбор модели объекта, от точности которой зависит качество работы будущей системы.

В работе было исследовано влияние вида выбираемой модели на качество работы АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором. В качестве исходных данных были взяты переходные процессы по температуре пара за вторичным перегревателем на прямоточном котле ТГМП-314, полученные на 50 % мощности [1].

В первом случае модель объекта была составлена с учетом выбега и представляла собой для основного канала сочетание нескольких апериодических звеньев, реального дифференцирующего звена и звена запаздывания. Модель для вспомогательного канала представляла собой сочетание апериодических звеньев и реального дифференцирующего звена. Во втором случае выбег не учитывался, модель представляла собой последовательное соединение трех апериодических звеньев и звена запаздывания для основного канала и двух апериодических звеньев — для вспомогательного.

Расчет настроек в обоих случаях проводился по методике [2]. В качестве критерия оптимальности был выбран линейный интегральный критерий.

После получения настроек системы для двух случаев было проведено моделирование процессов регулирования в MathLab и оценка качества регулирования. Также проводилось моделирование процессов регулирования в исходной системе с настройками, полученными без учета выбега переходных характеристик.

В результате оказалось, что в данном случае неучет выбега слабо влияет на качество регулирования, таким образом, можно вести расчеты по более простой модели.

Литература

1. **Кроль Л.Б., Кемельман Г.Н.** Промежуточный перегрев пара и его регулирование в энергетических блоках. М.: Энергия, 1970.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

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

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЦНД ПГУ В ТЕПЛОФИКАЦИОННОМ РЕЖИМЕ НА ПОНИЖЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Целью исследования является выявление ограничения на регулировочный диапазон парогазовой установки (ПГУ) при работе в теплофикационном режиме.

Процесс работы ПГУ на пониженных нагрузках в теплофикационном режиме сложный и зависит от множества факторов: температуры наружного воздуха, параметров пара контуров высокого и низкого давлений, теплового потребления, расхода сетевой воды и т.п. Одной из основных причин, влияющих на надежность и экономичность работы ПГУ, является режим работы цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины (ПТ).

При теплофикационных режимах верхняя граница регулировочного диапазона нагрузок опускается из-за снижения мощности ПТ, вызванной отбором части пара на нагрев сетевой воды.

Перевод блока ПГУ на частичные нагрузки реализуется за счет уменьшения расхода топлива на ГТУ с поддержанием номинальной температуры газов перед котлом-утилизатором (КУ), выполняемым прикрытием входного направляющего аппарата (ВНА). После полного возможного прикрытия ВНА дальнейшее снижение нагрузки приводит к уменьшению температуры газов на выходе газовой турбины и соответствующему снижению температуры острого пара за КУ, а следовательно, перед ПТ [1].

Снижение надежности работы ПТ в пределах регулировочного диапазона при постоянном давлении пара высокого давления связано с недопустимостью работы ЦНД при пониженной температуре острого пара, так как с уменьшением параметров пара контура высокого давления влажность за последней ступенью ЦНД увеличивается, вызывая опасность эрозии.

Предварительные расчеты показали, что при уменьшении мощности ПГУ на скользящем давлении после полного прикрытия ВНА, снижение температуры острого пара снижает опасность эрозийного износа рабочих лопаток последней ступени ЦНД, так как степень сухости пара немного возрастает. Таким образом, возникает возможность расширения регулировочного диапазона энергоблока ПГУ.

Литература

1. **Определение** допустимого регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-450Т при работе в конденсационном режиме / Ю.А. Радин, А.В. Давыдов, А.В. Чугин, И.Н. Писковацков // Теплоэнергетика. 2004. № 5. С. 47—52.

Ю.С. Бурцева, асп.; Ле Ньят Ань, Нгуен Тьи Линь, студенты;
рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК П-, ПИ- И ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ БЕСПОИСКОВЫМ МЕТОДОМ

Идея нового беспоискового метода настройки типовых регуляторов заключается в МНК-приближении комплексной частотной характеристики типового регулятора к КЧХ линейного оптимального регулятора при минимизации квадратичного критерия качества I_2.

Одним из достоинств данного метода является простота и универсальность получения параметров регулятора независимо от выбранного закона регулирования. В работе были найдены настройки типовых П-, ПИ- и ПИД-регуляторов для объекта второго порядка с запаздыванием [1].

Проведенные ранее исследования показали, что оптимизация относительно внутреннего воздействия $\lambda(t)$ гораздо сложнее, чем оптимизация относительно задающего $s(t)$ воздействия, при этом значительного улучшения в качестве процессов она не дает. В связи с этим оптимизация настроек была проведена только по заданию.

Выражения для передаточных функций субоптимальных одноконтурной системы и регулятора имеют вид

$$\tilde{W}_{sy}^{\text{opt}}(p)=\frac{\tilde{W}_{\mathbf{p}}^{opt}(p)W_{\mathbf{o}}(p)}{1+\tilde{W}_{\mathbf{p}}^{opt}(p)W_{\mathbf{o}}(p)}=\left(\frac{1}{T_{\mathbf{c}}p+1}\right)^{n}e^{-p\tau}, \qquad (1)$$

$$\tilde{W}_{\mathbf{p}}^{opt}(p)=\frac{1}{\tilde{W}_{\mathbf{o}}(p)}\frac{1}{(T_{\mathbf{o}}p+1)^{n}-e^{-p\tau}}. \qquad (2)$$

Сравнение переходных процессов, полученных для различных законов регулирования, было проведено с процессами, найденными традиционным методом, изложенным в [2]. Авторами даются рекомендации по выбору диапазона частот и постоянной времени сглаживателя $T_{\text{с}}$ для П-, ПИ- и ПИД-регуляторов и объектов различной структуры, в том числе без самовыравнивания и с экстремальной переходной характеристикой.

Литература

1. **Пикина Г.А., Мещерякова Ю.С.** Беспоисковый метод расчета настроек ПИД-регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика. 2012. № 10. С. 58—64.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

Е.Д. Васильев, асп.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С точки зрения повышения качества управления важную роль играет принцип опережающего управления, который требует определенных изменений в традиционных схемах управления в АСУ ТП. Появляется управляющий блок, который базируется на текущих данных традиционной АСУ ТП и позволяет с опережением прогнозировать соответствующие изменения в режимах работы энергетического оборудования. Опережающее значение для корректируемой величины (на примере качества управления по показателю энергетической эффективности — экономичности производства электроэнергии на КЭС [1]) является необходимым корректирующим воздействием при управлении эффективностью технологического процесса в автоматическом режиме, а именно: переходом к решению перспективных задач АСУ ТП [2]. Опережающее управление рассматривается как передача сигнала по нагрузке и моделирование сигнала по расходу топлива исходя из оперативного прогноза расхода топлива при известных текущей мощности энергоблока и требуемого значения по диспетчерскому графику. Формируется модель упреждающего управления, позволяющая формировать значение величины расхода топлива еще до фактического потребления, снижающая инерционность канала «котлоагрегат—турбина—генератор». Повышение качества управления работой энергоблока происходит за счет сокращения длительности нагружения/разгружения и возможности использования при этом оптимальных скоростей изменения нагрузки. По показателям надежности на основе упреждающих оценок необходимо сформировать модель системы оперативного планирования ремонтно-профилактических работ по текущему состоянию оборудования при использовании технического и параметрического диагностирования. Принцип опережающего управления, концепция комплексного управления надежностью оборудования электростанции являются начальным этапом в реализации структуры управления эффективностью АСУ ТП.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Старшинов В.А** Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. М.: МЭИ, 1993. — 328 с.

2. **Аракелян Э.К., Васильев Е.Д.** Перспективный подход в построении высокоэффективной АСУ ТП // Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2013», г. Иваново, 23—25 апреля 2013 г. С. 179—183.

Д.С. Гайдержий, асп. (НИУ «МЭИ»); рук. В.П. Шевчук, д.т.н., проф. (Филиал МЭИ в г. Волжском)

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКА

В ходе экспериментальных исследований в качестве критериев управления энергоблоком была выбрана эффективность функционирования котлоагрегата (1) и эффективность функционирования паровой турбины (2) [1]:

$$Э_K(iT_S) = \frac{Y_1(iT_S)\cdot Y_5(iT_S)\cdot \mathrm{int}(Y_6(iT_S))}{\sum_{j=0}^{N} X_1(iT_S)h_{15}((j-i)T_S)\cdot \sum_{j=0}^{N} X_2(iT_S)h_{21}((j-i)T_S)\cdot \mathrm{int}(Y_6(iT_S))}, \quad (1)$$

где $Y_1(iT_S)$ — текущее значение расхода перегретого пара; $Y_5(iT_S)$ — текущее значение температуры перегретого пара; $Y_6(iT_S)$ — текущее значение давления перегретого пара; $X_1(iT_S)$ — элементы массива текущих значений расхода топлива; $X_2(iT_S)$ — элементы массива текущих значений расхода воды; $h_{15}(jT_S)$ — элементы массива весовых коэффициентов по каналу влияния расхода топлива на температуру перегретого пара; $h_{21}(jT_S)$ — элементы массива весовых коэффициентов по каналу влияния расхода питательной воды на расход перегретого пара; $\mathrm{int}Y_6(iT_S)$ — энтальпия перегретого пара при текущем значении давления перегретого пара; N — длина массивов программного обеспечения.

$$Э_T(iT_S) = \frac{W(iT_S)}{\sum_{j=0}^{N} X(iT_S)\cdot h_{11}((j-i)T_S)}, \quad (2)$$

где $X(iT_S)$ — массив текущих значений расхода перегретого пара; $W(iT_S)$ — текущее значение активной мощности турбоагрегата; $h_{11}(jT_S)$ — массив динамической характеристики турбоагрегата.

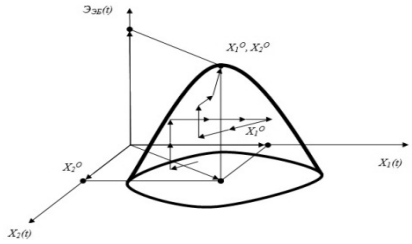


Рис. 1. Геометрическая интерпретация работы алгоритма управления

Это позволило спроектировать программно-аппаратные приборы для измерения эффективности, реализовать адаптивное управление энергоблоком по критерию максимума эффективности [2] с помощью алгоритма текущей идентификации положения рабочей точки энергоблока.

Литература

1. **Грошев Н.А., Кузеванов В.М.** Способ контроля эффективности работы котлоагрегата // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2007. № 6. С. 53—57.

2. **Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П.** Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах. М: ФИЗМАТЛИТ. 2009. — 512 с.

И.И. Галиев, студ.; рук. А.Н. Черняев, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

УСТРОЙСТВО НАКОПИТЕЛЬНОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С ИЗОЛИРОВАННЫМ РЕЗЕРВУАРОМ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

Электрические котлы для систем отопления и приготовления горячей воды являются наиболее популярным и современным вариантом отопительного оборудования для частных домов и городских квартир ввиду своей бесшумности, безопасности и экологичности.

Недостатком современной конструкции водогрейного котла является падение температуры воды на выходе котла при непрерывной подаче холодной воды на вход. Эта проблема решается модернизацией конструкции водогрейного котла, показанной на рис.1. Поступающая в котел холодная вода сначала подогревается в промежуточном теплообменнике, а затем кипит в верхнем резервуаре, где происходит процесс образования и сепарации греющего пара для всего котла. Пар подогревает холодную воду в промежуточном теплообменнике и конденсируется в нижнем резервуаре, где накапливается горячая вода, температура которой будет оставаться постоянной.

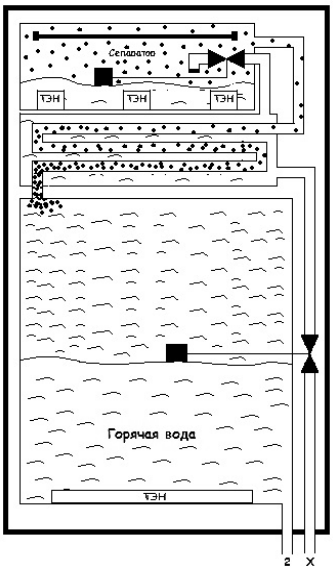


Рис. 1. Конструкция котла

При одинаковых габаритах, суммарный объем горячей воды в предлагаемом водогрейном котле больше, чем в существующих на рынке. Затраты на модернизацию водогрейного котла небольшие при большом объеме рынка, что позволяет говорить о возможности серийного производства.

М.Ю. Гречкин, студ.; рук. В.В. Усенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АСР С ЦЕЛЬЮ ПОДСТРОЙКИ И ПЕРЕНАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Целью работы является разработка алгоритма и программы самоподстройки АСР с ПИ законом регулирования. Это всегда было и остается актуальным, что подтверждается обследованиями 350 предприятий фирмой Honeywell, в ходе которых проверено 100 000 контуров АСР на предмет оптимальности их работы. В результате установлено, что только 1/3 АСР работают с нормальными настройками. Honeywell пришла к выводам, что если регуляторы работают хоть как-нибудь, то их не перенастраивают. В целом только 4,4 % регуляторов перенастраиваются за два года, что объясняется дефицитом опытных наладчиков и дороговизной процедур проведения оптимизации [1].

Сегодня практически все методы автоматической настройки АСР связаны с необходимостью подачи в систему тестовых сигналов. Предлагаемая методика подстройки АСР не требует использования каких-либо тестов. Ее можно отнести к классу пассивных методов оптимизации АСР.

В частности, вычисляются текущие статистические показатели качества автоматизируемого процесса наблюдения, таких как время пребывания процесса за зоной нечувствительности, число попаданий максимумов в зону риска процесса и др. Фиксируемые показатели запоминаются как образцовые и используются в дальнейшем для сравнения с текущими аналогичными показателями. В случае обнаружения недопустимой разницы между ними поступает сообщение о необходимости перенастройки системы или устранения неполадок [2].

Предлагаемый метод контроля и подстройки адаптируется для диагностирования неисправностей в системе АСР, что является вкладом автора.

Литература

1. **Arakelyan E.K., Usenko V.V., Usenko V.V.** Automation of Process Pretuning by a Fuzzy-Similar Method // Fuzzy Control Physica-Verlag Germany. 2000/

2. **Усенко В.В** Realization Features of Crisp and Fuzzy Control Algorithms. // 10 th Inter Conferens, Zittau. 2002.

З.И. Джамалова, стажер; рук. В.А. Шихин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РОЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Электроэнергетика является базовой отраслью экономики всех стран. Надежное и эффективное функционирование электроэнергетики, бесперебойное снабжение потребителей — основа поступательного развития экономики страны и неотъемлемый фактор обеспечения цивилизованных условий жизни всех ее граждан.

Обеспечение единства измерений в энергетической отрасли, полнота и качество метрологического обеспечения электроэнергетических отраслей являются одними из важнейших условий экономического развития современного государства. Актуальность решаемой научной задачи обусловлена тем, что в настоящее время повышаются требования к своевременности, полноте и оперативности метрологического обслуживания в сфере электроэнергетики и средств измерений, находящихся в эксплуатации [1].

Метрологическое обеспечение является одной из важных составляющих электроэнергетической отрасли. Необходимо создать новые методы и алгоритмы решения задач организации и планирования метрологического обеспечения электроэнергетической отрасли, объединяющих в единое целое современные математические подходы и современные средства программного обеспечения с учетом потребностей в метрологическом обслуживании электроэнергетических предприятий [2].

Для разработки алгоритмов и методов оптимизации процессов метрологического обеспечения электроэнергетической отрасли решаются следующие задачи:

- исследуются программно-технический комплекс АИИС КУЭ и регулирующие нормативные документы в области построения и функционирования метрологического обеспечения на ОРЭ;
- формулируются проблемы повышения достоверности измерительной информации для исходной АИИС КУЭ крупного промышленного потребителя электроэнергии;
- синтезируется математическая формулировка задачи исследования с целью повышения достоверности данных АИИС КУЭ.

Литература

1. **Клаассен К.Б.** Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: учебное пособие.

2. **Загорский Я.Т., Комкова Е.В.** Границы погрешности измерений при расчетном и техническом учете электроэнергии // Электричество. 2001. № 8. С. 14—17.

Е.А. Дубов, асп.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭС

Целью работы является разработка алгоритмов защит тепломеханического оборудования, подстраиваемых под различные условия эксплуатации ТЭС.

Воздействие защит имеет наивысший приоритет по отношению к другим дискретным воздействиям (пошаговому логическому управлению, технологическим блокировкам, дистанционному управлению).

Действие защит является односторонним. Обратный ввод отключенного защитой оборудования выполняется персоналом после выполнения защитами своих функций.

Действие защит не должно препятствовать работе оборудования в режимах пуска и останова. Отключение и последующее включение защит, препятствующих осуществлению этих режимов, проводится автоматически по условиям работы оборудования.

В алгоритмах защит предусматривается возможность вывода защиты в ремонт или на время опробования (накладки). Все действия по вводу и выводу защит регистрируются и архивируются.

В России применяются следующие принципы формирования инициативного сигнала при отказе канала (каналов) измерения: защита «1 из 1-го», защита «2 из 2-х», защита «2 из 3-х».

При отказе канала регулирования одноконтурной АСР регулирующий клапан переводится с автоматического в дистанционный режим. При двухконтурных системах или схемах с дифференциатором в зависимости от назначения возможно перестроение схемы с изменением параметров настройки и регулирование оставшейся достоверной величины. После аппаратной обработки сигнала датчика получается сигнал, преобразованный в цифровой код, с сопровождающим его бинарным сигналом качества (исправный/неисправный). Недостоверный код качества может быть вызван обрывом цепи датчика, выходом сигнала датчика за диапазоны измерения, отсутствием питания на модуле УСО. Контроль достоверности измерения аналогового сигнала включает формирование параметрического отказа. Под параметрическим отказом понимается выход сигнала измеряемого параметра за установленные значения. Контроль достоверности дискретного сигнала включает диагностику на несоответствие состояния нормально замкнутого и нормально разомкнутого контакта (наличия двух единиц или нулей) для дискретных сигналов, вводимых по 3-проводной схеме (перекидные контакты).

В.Д. Иванов, асп., В.О. Киндра, студ.;
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЛАНСОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВСЕЙ СХЕМЫ ТЭС

Алгоритм коррекции [1] возможно использовать для получения оценок значений для измеряемых и неконтролируемых параметров технологической схемы ТЭС. Оригинальная методика предполагает, что начальные значения неизвестных параметров можно взять из опыта эксплуатации или из паспортных (регламентных) документов. Предлагается способ определения оценок значений неконтролируемых параметров с использованием балансовых соотношений. Необходимо воспользоваться алгоритмом, поставив задачу коррекции только для неконтролируемых параметров. При этом рекомендуется задаваться равной степенью доверия для всех определяемых параметров. Количество искомых неконтролируемых параметров не должно превышать число балансовых уравнений.

Существует проблема, которая заключается в том, что полученные оценки значений, которые планируется использовать как начальные условия для коррекции, содержат невязку балансовых соотношений. Таким образом, при коррекции совместно измеряемых и неконтролируемых параметров (определенных вышеизложенным методом) некоторые балансовые соотношения окажутся заранее сведенными, что неверно. Одним из способов решения данной проблемы является вычисление средней оценки значения каждого неконтролируемого параметра, получаемой путем усреднения оценок полученных по разным наборам данных. Наборы данных необходимо подбирать исходя из определенных правил:

1) режим работы ТЭС должен быть полностью идентичен режиму, для которого определяются неконтролируемые параметры;

2) временные интервалы, в течение которых получены наборы данных, должны быть равны;

3) наборы данных должны быть актуальными, т.е. быть полученными не ранее чем за неделю до момента времени, для которого определяются неконтролируемые параметры.

Литература

1. **Диагностика** информационных подсистем АСУТП с использованием технологий искусственного интеллекта / А.И. Репин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, С.Н. Андреев // Теплоэнергетика. 2006. № 6.

В.Д. Иванов, асп., В.О. Киндра, студ.;
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОСТРОЕНИЕ ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ ТЭС НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ

Модель создана для получения оценок результатов измерения параметров, удовлетворяющих материальным и тепловым балансам оборудования и всей технологической схеме ТЭС. Методика является универсальной и может применяться к различным тепловым схемам без адаптации. Основой для построения объектной модели является тепловая схема ТЭС. Любой теплотехнический агрегат может рассматриваться как узел (node), обладающий уникальными входами и выходами. Количество входов и выходов заранее не задается. Связи между агрегатами представляются потоками.

Поток (flow) — сущность, которая связывает узлы друг с другом [1]. Поток отражает такие характеристики рабочего тела, как температура, давление и расход. У каждого потока существует начало и конец, для которого его характеристики условно принимаются равнозначными.

Моделирование происходит путем создания узлов, потоков и их соединения как отражение актуальной тепловой схемы станции. Узел обладает определенной логикой, которая позволяет рассчитывать тепловые и материальные балансы, а также оценку значения потерь в зависимости от связанных с ним потоков. Узел представляет собой абстракцию смешивающего или поверхностного теплообменника.

Создание такой модели легче обычного подхода, который предусматривает составление балансовых уравнений вручную. Каждый узел предусматривает проверку адекватности соединений, т.е. при ошибках будут генерироваться исключения (exceptions).

С помощью объектной модели возможно определить перечень измеряемых параметров, необходимых для расчета, и возможные точки установки измерительных приборов.

Модель также предусматривает отключение любого выбранного узла. Отключение узла вызывает остановку потоков, что в свою очередь приводит к отключению зависимых от них узлов. Такая опция позволяет моделировать отключение реального оборудования на станции. При этом модель автоматически учитывает это при расчетах.

Литература

1. **Эванс Эрик.** Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2011.

К.С. Комова, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИКИ КОНДЕНСАТОРА БЛОКА

Конденсатор ТЭС представляет собой теплообменник поверхностного типа, математическая модель конденсатора аналогична модели подогревателей. Греющей средой здесь является отработанный в турбине пар, рабочей средой — охлаждающая вода. Эффективность работы конденсатора зависит от параметров процесса конденсации пара: температуры и расхода охлаждающей воды, от состояния элементов конденсационной установки — степени загрязнения трубок, количества заглушенных трубок, количества присасываемого воздуха, исправности эжекторной установки и т.д. Известно также, что процесс образования отложений на внутренней поверхности трубок конденсатора медленнотекущий. При нормальном функционировании конденсатора и отсутствии дополнительных потоков воды, поступающего в конденсатор, указанные количества теплоты должны быть равны между собой.

Температура конденсации пара является функцией расхода и температуры охлаждающей воды, расхода пара, поступающего в конденсатор [1,2]. При постоянном расходе и температуре охлаждающей воды коэффициент теплопередачи в довольно широком интервале изменения расхода пара в конденсатор мало изменяется. Процесс роста давления пара в конденсаторе из-за загрязнения его поверхностей нагрева растянут во времени, и управлять состоянием конденсатора можно путем оптимизации сроков его очистки с применением известных методов очистки (механического, химического, термического). В качестве диагностического параметра, определяющего текущее состояние конденсатора, принимаем текущее значение давления в конденсаторе $P_{\text{к}}(t)$ или отношение

$$\beta_{P_{\text{к}}} = \frac{P_{\text{к}}(t)}{P_{\text{к}0}}.$$

Рассмотренная математическая модель помогает оценить качество работы конденсатора при номинальной и пониженной нагрузках.

Литература

1. **Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И.** Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС. М.: Энергоиздат, 1982.

2. **Тепловые** и атомные электростанции: учебник для вузов / Л.С. Стерман, С.А. Тевлин, А.Т. Шарков; под ред. Л.С. Стермана. — 2-е изд., исп. и доп. М.: Энергоиздат, 1982.

А.В. Коротеев, студ.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMULINK ПАКЕТА MATLAB ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ПАРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

В настоящей работе предлагается имитационная модель двусвязной системы регулирования давления перегретого пара для обеспечения потребителя требуемым количеством пара с заданными параметрами в соответствии с суточным графиком тепловой нагрузки, реализованная в среде моделирования Simulink пакета MatLab.

При разбалансах между текущим потреблением и выработкой пара появляются отклонения давления пара на выходе котла. На работающем в регулирующем режиме котле регулятор давления перегретого пара вносит корректирующее воздействие в задание регулятора расхода топлива, который изменением расхода топлива устраняет отклонения давления пара. Регулятор общего воздуха работает в следящем режиме от расхода топлива. Он, воздействуя на направляющие аппараты дутьевых вентиляторов, изменяет расход воздуха, выдерживая заданное соотношение расходов «Топливо—воздух».

Процесс горения в модели представлен статической зависимостью тепловыделения Q_T процесса сжигания топлива B_T при установленном соотношении с расходом воздуха V_B:

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

где α_0, α_1, α_2, α_3 — коэффициенты, определяющие калорийность топлива и состояние котла.

Выражение (1) получено из графика зависимости КПД «брутто» котла от коэффициента избытка воздуха α при постоянной теплопроизводительности котла [1]. В результате пересчета значений α в расходы воздуха V_B получена номограмма графиков зависимостей требуемых расходов топлива B_T для выработки отбираемых потребителем расходов пара, по которой установлено соотношение расхода воздуха к расходу топлива в пересчете на % УП 0,546.

Литература

1. **Воликов А.Н.** Энергоэкологическая реабилитация — экономичный путь повышения энергоэффективности предприятия // Инженерные системы. 2011. Вып. № 2.

А.В. Коротеев, студ.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ В SIMULINK MATLAB АЛГОРИТМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВОГО КОТЛА

В настоящей работе предлагается алгоритм командного блока экстремального регулятора (КБ ЭР). Работа КБ ЭР в схеме регулирования экономичности парового котла состоит в поиске и поддержании такого расхода воздуха, при котором котел для выработки требуемого расхода пара заданных параметров будет потреблять минимальное количество топлива.

Представленная на рис. 1 структурная схема КБ ЭР реализована в среде имитационного моделирования Simulink пакета MatLab [2]. КБ ЭР предназначен для работы в составе динамической модели парового котла. Динамическая модель работающего в регулирующем режиме парового котла с регуляторами давления перегретого пара, расходов топлива и воздуха рассматривается в докладе настоящей конференции [3].

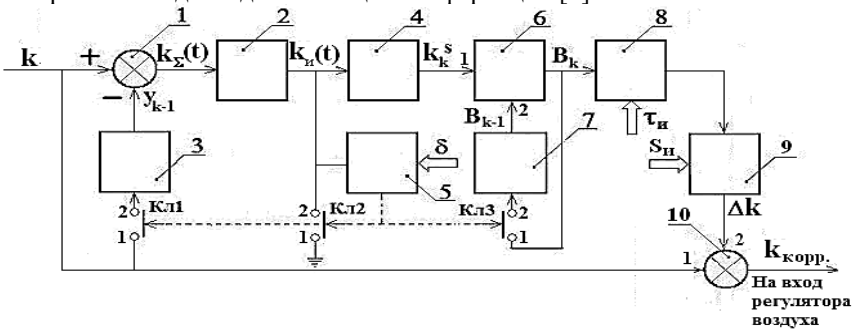


Рис. 1. Структурная схема командного блока экстремального регулятора:
1, *10* — сумматоры; *2* — интегратор; *3* — ячейка памяти входного сигнала; *4* — сигнум-реле; *5* — реле; *6* — умножитель; *7* — ячейка памяти выходного сигнала; *8* — таймер длительности импульса; *9* — интегратор корректирующего сигнала

Литература

1. **Сабанин В.Р., Кормилицын В.И., Коптев В.С.** Командный блок для экстремального регулятора. Патент РФ № 2475797 Опубл. 20.02.2013.

2. **Черных И.В.** Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. И.: ДМК Пресс, 2003.

3. **Коротеев А.В., Сабанин В.Р.** Применение графической среды имитационного моделирования SIMULINK пакета MatLab для исследования связной системы регулирования нагрузки паровых энергетических котлов. Настоящий сборник.

А.В. Коротеев, студ.; рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ПАКЕТЕ MATHCAD

В настоящей работе предлагается расчет параметров настройки ПИ-регулятора на предельную степень апериодической устойчивости одноконтурной АСР [1]. Система представлена в виде имитационной модели объекта управления с ПИ-регулятором, реализованной в среде MathCAD. В результате расчета были получены переходные процессы в различных каналах. Переходной процесс (рис. 1, график *1*) имеет предельную апериодическую устойчивость, т.е. корни характеристического уравнения являются действительными и расположены на минимальном расстоянии от мнимой оси слева. Также в работе автором предложен метод настройки регулятора на корневой показатель устойчивости $m = 1$. Переходной процесс при этом становится менее инерционным (рис. 1, график *2*), а за счет увеличения зоны нечувствительности регулятора можно исключить переключение регулирующих устройств. Полученные настроечные параметры использованы в АСР подачи воздуха в связной системе регулирования нагрузки котла [2] для исключения влияния колебаний процесса на регулятор топлива и на систему в целом.

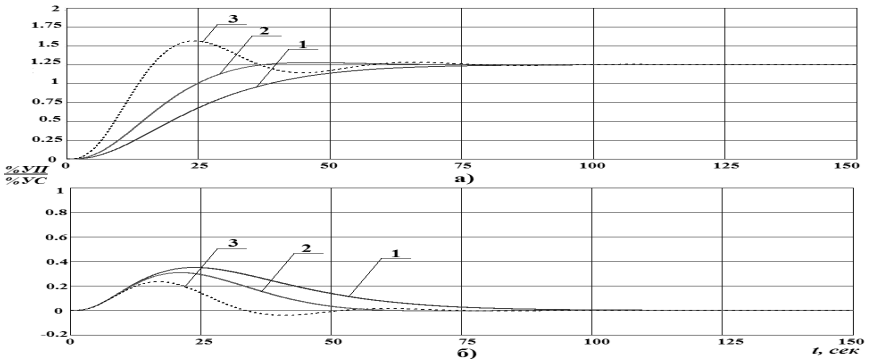


Рис. 1. Переходные процессы для различных настроек ПИ-регулятора:
а — по каналу управления; *б* — по каналу регулирования; *1* — предельная степень апериодической устойчивости; *2* — корневой показатель устойчивости $m = 1$ ($\psi = 0{,}998$); *3* — корневой показатель устойчивости $m = 0{,}3665$ ($\psi = 0{,}9$)

Литература

1. **Татаринов А.В., Цирлин А.М.** Предельная степень апериодической устойчивости линейных систем и выбор параметров промышленных регуляторов. Т.19. 2012. № 2.

2. **Коротеев А.В., Сабанин В.Р.** Применение графической среды имитационного моделирования SIMULINK пакета MATLAB для исследования связной системы регулирования нагрузки паровых энергетических котлов. Настоящий сборник.

О.М. Кременчугский, студ.; рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА В TRACE MODE 6

В данной работе была разработана АСР температуры перегретого пара в SCADA — системе Trace Mode 6. В качестве системы была выбрана АСР с контролем по вспомогательной величине — с регулятором и дифференциатором. На рис.1 представлен фрагмент данной работы.

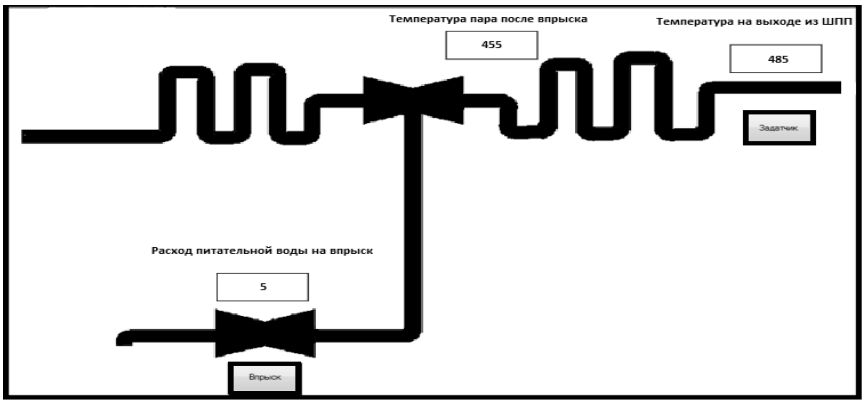


Рис. 1. Функциональная схема АСР в Trace Mode 6

В ходе работы были рассчитаны оптимальные параметры выбранной АСР, с помощью алгоблоков была составлена структурная схема, реализован динамический процесс впрыска питательной воды в режиме реального времени. Установлены индикаторы, показывающие изменение значений контролируемых параметров (температура перегретого пара и расход питательной воды на впрыск), кроме того, пользователь может изменять расход питательной воды на впрыск путем ввода значения расхода с клавиатуры [1, 2].

Преимуществом работы является наглядность проходящих в системе процессов, и при дальнейшей модернизации можно использовать данную программу в качестве тренажера для студентов с целью получения навыков работы с системой.

Литература

1. **Кроль Л.Б., Кельман Г.Н.** Промежуточный перегрев пара и его регулирование в энергетических блоках. М.: Энергия, 1970.

2. **AdAstra Research Group.** Быстрый старт Trace mode 6, AdAstra Research Group**,** 2007.

Д.Ю. Кузнецов, студ.; рук. И.В. Тетеревков, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ, ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ, В ПТК КВИНТ

Необходимость в росте эффективности производства энергии приводит к изменению подходов к проектированию систем управления: наряду с использованием стандартных регуляторов, реализующих жесткие законы, большое внимание уделяется проектированию и эксплуатации так называемых оптимальных систем управления. В современных отечественных ПТК практически отсутствуют алгоритмы, связанные с работой адаптивных и оптимальных систем. Цель работы — восполнить этот пробел.

При переходе на новый режим работы технологического объекта АСУ должна обеспечить переходный процесс с максимальным быстродействием и с отсутствием перерегулирования. Эту задачу решают системы, оптимальные по быстродействию. Классический подход к построению таких систем основан на применении метода фазового пространства. Практическая реализация на реальном микропроцессорном контроллере показала негативное влияние разрядности и шага квантования прибора на качество работы системы, поэтому автором для построения системы было предложено применить метод переменного коэффициента усиления [1].

Разработанные алгоритмы реализованы в ПТК КВИНТ. Для практически важных типов передаточных функций объектов управления параметры системы рассчитываются автоматически. Реальные ограничения по мощности управляющего воздействия учитываются с помощью возможности перевести систему в режим работы с любым шагом квантования, не равным шагу самого микропроцессорного контроллера. На уровень нового задания объект выходит за n интервалов квантования, где n — порядок передаточной функции объекта.

В процессе тестирования созданная система показала отличные результаты работы: по сравнению с обычным ПИ-регулятором быстродействие повышается примерно в 15 раз. Однако при отработке внутренних возмущений применение обычных регуляторов оказывается более эффективным, поэтому автором реализована система с перестраиваемой структурой, которая в управляющей части реализует обычный ПИ-закон, а при изменении задания алгоритм управления соответствует системе, оптимальной по быстродействию.

В перспективе полученные результаты могут быть использованы в составе систем управления на тепловых и атомных электрических станциях.

Литература

1. **Ту Ю.** Современная теория управления. М.: Машиностроение, 1971.

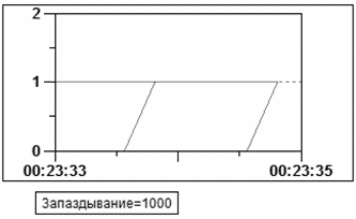
М.В. Кузнецова, Я.А. Малова, студенты; рук. Е.И. Мерзликина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЕВ В СРЕДЕ CoDeSys

CoDeSys — это современный инструмент, предоставляющий собой удобную среду для программирования контроллеров на языках стандарта МЭК 61131-3, а также отладки программы контроллера в режиме эмуляции [1].

CoDeSys имеет несколько стандартных библиотек, которые позволяют использовать функции, готовые элементы и операции [3]. Также пользователь может самостоятельно создавать библиотеки и использовать их в дальнейшей работе. В стандартных библиотеках CoDeSys отсутствуют блоки для создания модели объекта, что может затруднить отладку программы в режиме эмуляции, не предполагающем работу с реальным физическим объектом.

Для решения этой проблемы была разработана библиотека элементарных динамических звеньев (ЭДЗ), что позволит упростить работу при создании и отладке систем управления в CoDeSys. В библиотеке представлены пропорциональное, интегрирующее, апериодическое и запаздывающее звенья [2], выполненные в виде пользовательских функциональных блоков. Численные параметры звеньев задаются в виде входных переменных блоков. Например, на рис. 1 представлены визуализация и программный код для звена запаздывания, написанный на языке ST с использованием элементов Timer и Trigger.




```
Timer(PT:=PT_Input);
IF(X = UROVEN) THEN
    Y:=X;
ELSE
    Timer.IN:=TRUE;
END_IF
Timer();
TR_Timer(CLK:=Timer.Q,Q=>);
IF (TR_Timer.Q)
THEN
    UROVEN := X;
    Timer.IN:=FALSE;
END_IF
```

Рис. 1. Визуализация и программный код для звена запаздывания

Литература

1. **Петров И.В.** Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004.

3. **Кузищин В.Ф., Мерзликина Е.И.** Исследование АСР температуры электрической печи на базе контроллера ПЛК 150. Лабораторная работа № 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

Ле Ван Динь, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

АППРОКСИМАЦИЯ МОДЕЛЕЙ РЕАКТОРА ВВЭР-440 С КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОСТИ ПО МОЩНОСТИ

Разработанные в [1] линейные динамические модели атомных реакторов типа ВВЭР являются моделями с распределенными параметрами (РП) и шестью группами запаздывающих нейтронов. Модели эти в отличие от моделей с сосредоточенными параметрами (СП), приведенные, например, в [2], обладают значительно большей точностью представления реальных процессов реактора, но и значительно сложнее СП моделей.

В качестве примера приведем передаточную функцию РП модели [1] для канала «внешняя реактивность —температура теплоносителя»:

$$W_{\Delta k\,\theta}(p,z) = W_{\text{кин}}(p)\,\frac{\dfrac{Q_0}{\alpha H_{\text{тв}}}W_{\text{тв}}(p)\,\text{St}}{1-K_{\text{I}}(p)}\left[\frac{1}{A(p)}\left(1-\text{e}^{-A(p)z}\right)\right],$$

где $A(p)=\tau p+\text{St}\left[1-W_{\text{тв}}(p)+k_H\left(1-W_{\text{к}}(p)\right)\right]$;

$$W_{\text{тв}}(p)=\frac{1}{T_{\text{тв}}p+1};\ W_{\text{кин}}(p)=\frac{1}{lp+\sum\limits_{i=1}^{6}\dfrac{\beta_i p}{p+\lambda_i}};\ W_{\text{к}}(p)=\frac{1}{T_{\text{к}}p+1}.$$

Для температуры на выходе из реактора модель канала должна быть еще дополнена моделью надреакторного объема воды.

Использовать такой сложности выражения при моделировании систем регулирования весьма затруднительно. Поэтому в данной работе ставится и решается задача аппроксимации трансцендентных передаточных функций дробно-рациональными функциями невысокого порядка. Особое внимание при этом уделяется хорошему приближению частотных характеристик моделей в существенной для синтеза АСР области частот.

Литература

1. **Ле Ван Динь, Пикина Г.А.** Разработка и сравнение двух моделей реактора ВВЭР-440 с мощностным коэффициентом реактивности // Сб. тез. докл. 19 Междунар. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». МЭИ, 2013. С. 165.

2. **Плютинский В.И., Погорелов В.И.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1983.

А.В. Левашов, асп.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСР С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ ПО ПРОГНОЗУ

Прогностические алгоритмы воплощают идею частичной или полной компенсации инерционности в объекте за счет того, что управление осуществляется не по текущему состоянию объекта, а по состоянию, ожидаемому через время прогнозирования в будущем. Система управления в этом случае оказывает на объект упреждающее воздействие, в результате чего и становится возможным частично скомпенсировать инерционность объекта, т.е. отстающую реакцию объекта на действия управляющего устройства. Подробнее об этом сказано в [1, 2, 3].

Для исследования прогностической АСР в математическом пакете MathCAD разработана и демонстрируется программа, которая позволяет:

1) моделировать одноконтурную, двухконтурную с дифференциатором и каскадную с двумя регуляторами, с компенсацией возмущения схемы регулирования, с обычным управлением или управлением по прогнозу;
2) моделировать объекты управления с различными динамическими характеристиками, типичными для тепловых процессов;
3) находить оптимальные настройки систем выбранной структуры методами Е.Г. Дудникова или В.Я. Ротача [4];
4) рассчитывать переходные процессы с помощью разностных уравнений для различных переменных;
5) оценивать точность регулирования по различным показателям;
6) учитывать ограничение на скорость исполнительного механизма;
7) формировать любые входные воздействия как детерминированные, так и случайные.

Литература

1. **Пикина Г.А., Кузнецов М.С.** Синтез линейных прогностических алгоритмов регулирования // Электронный журнал «Новое в российской электроэнергетике». 2009. № 10. С. 40—44.

2. **Пикина Г.А., Кузнецов М.С.** Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. 2010. № 10.

3. **Пикина Г.А., Кузнецов М.С.** Методы настройки прогностических типовых алгоритмов регулирования // Теплоэнергетика. 2012. № 2. С. 64—67.

4. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2008.

П.Б. Нихасигайе, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА КВ-ГМ-100 С РАЗРАБОТКОЙ АСР ПИТАНИЯ КОТЛА ВОДОЙ

Регулируемыми величинами в котле являются температура прямой сетевой воды $t_{с.в}$, а также расход питательной воды в зависимости от давления обратной сетевой воды $P_{о.с}$.

Температура воды на выходе устанавливается вручную через задающее устройство, на выходе из котла измерение температуры проводится с помощью термоэлектрических термометров ТХА-0179. Сигнал с термоэлектрических термометров поступает [1] на вторичный регистрирующий и показывающий прибор А 542 (52/6), а сигнал по изменению перепада температуры измеряется при помощи преобразователя САПФИР-22М. Унифицированный сигнал поступает на регулятор РС 29.0.12 и на вторичный прибор А542.

В регуляторе происходит суммирование сигналов (расхода газа и температуры воды) с преобразователей с заданным значением. Если эти величины равны, то регулятор не оказывает воздействия на объект. Если регулируемый параметр отклоняется от заданного значения, то на выходе регулятора вырабатывается импульсный сигнал, который в усилителе У29.3 преобразуется в изменение состояния бесконтактных ключей. Усилитель У29.3 имеет три бесконтактных ключа для управления исполнительным механизмом МЭО (57/6), вал которого через систему тяг и рычагов сочленен с регулирующим органом КРП 100 (57), изменяющим подачу газа в топку котла.

Перепад давления, пропорциональный расходу воды, создается на диафрагме ДКС 10–200–А/Г (ВК-52), установленной на водопроводе, преобразуется измерительным преобразователем САПФИР-22М (57/2) в унифицированный токовый сигнал 0—5 мА и подается на блок извлечения корня БИК-1 (57/3), предназначенный для линеаризации статической характеристики преобразователя САПФИР-22М, с выхода которого поступает на регулятор РС 29.0.12 (57/4) и на вторичный прибор А542.

Структурная схема, выполненная из этих допущений, позволяет исследовать свойства АСР питания котла в различных режимах эксплуатации [2]. Кроме того, оптимизация режимов работы котла дает значительный экономический эффект.

Литература

1. **Ротач В.Я.** Расчет систем несвязанного и автономного управления многомерными объектами // Теплоэнергетика. 1996. № 10.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2004. — 400 с.: ил.

Г.М. Орманова, стажер; рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Обеспечение качества производимой продукции и эффективный менеджмент качества являются одним из важнейших условий экономического развития современного государства. Ключевым моментом, определяющим успешное управление качеством, является применение количественных методов, основанных на статистическом анализе данных, что обеспечивает объективность в оценке ситуации и принятии решений.

Для разработки методики контроля и управления качеством на основе методов математической статистики [1] и современного программного обеспечения [2] решаются следующие основные задачи:

– исследование статистических методов анализа данных в целях выбора методов, наиболее эффективных для решения задач контроля и управления качеством;

– анализ современных программных средств, обеспечивающих оптимальные возможности для реализации методик контроля и управления качеством;

– исследование и анализ основных проблем в сфере контроля качества предприятий и организаций различных форм собственности;

– теоретическое исследование свойств выбранных статистических методов и алгоритмов контроля и управления качеством;

– разработка методик решения конкретных задач контроля и управления качеством:

– разработка программной реализации предложенных методик.

В процессе решения задач ожидается получение научных результатов в виде методики решения статистических задач контроля качества, обоснованных теоретически в соответствии с положениями современной математической статистики и реализованных практически с использованием современных программных средств.

Литература

1. **Справочник** по прикладной статистике / под ред. Э. Ллойда, У. Ледерман. М.: Финансы и статистика, 1989. — 510 с.

2. **Кремер Н.В., Путко Б.Б.** Эконометрика. М.: Наука, 2002. — 312 с.

Е.К. Перфильева, студ.; рук. Н.И. Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ АСР ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Решается задача выбора оптимальной алгоритмической структуры и расчета многоконтурных каскадных АСР и многоконтурных АСР с дифференциаторами численным методом с использованием эволюционного алгоритма «Optim-MGA» [1, 2]. Предлагаемый подход позволяет без промежуточных итераций определять оптимальное состояние системы, одновременно определяя настроечные параметры регуляторов с заранее выбранной алгоритмической структурой и дифференциаторов в области, ограниченной заданным запасом устойчивости по показателю колебательности М.

Достаточно легко проводимый сравнительный анализ позволяет выбрать наиболее эффективную структуру многоконтурной АСР.

В качестве критерия с целью лучшей сходимости рекомендуется интеграл по модулю, объединяющий максимальное отклонение с длительностью процесса регулирования.

Практика расчетов показала, что для соблюдения заданного запаса устойчивости системы достаточно накладывать ограничение лишь на внутренний, самый малоинерционный и высокочастотный контур.

При сравнении двухконтурных каскадных систем с двумя ПИ-регуляторами и трехконтурных с тремя ПИ-регуляторами значения коэффициентов при интегральных составляющих вспомогательных регуляторов могут оказаться близкими к нулю, что позволяет ограничиться алгоритмической структурой с вспомогательными П-регуляторами.

Изложенная методика позволяет использовать данный подход на стадии проектирования для решения задачи синтеза и анализа многоконтурных АСР практически любой размерности и конфигурации.

Литература

1. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3—4. С. 78—85.

2. **Смирнов Н.И., Репин А.И., Сабанин В.Р.** Структурная и параметрическая оптимизация каскадных САР с использованием эволюционных алгоритмов // Автоматизация и IT в энергетике. 2010. № 5. С. 26—34.

Л.С. Петрова, студ.; рук. Н.И. Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Аппроксимация переходной характеристики объекта управления проводилась по численной выборке переходного процесса методом наименьших квадратов. Критерий идентификации $I_{\text{ид}}$ формировался в виде интеграла квадрата разности выходов реальной переходной характеристики $y(t)$ и ее модели $y_{\text{м}}(t)$:

$$I_{\text{ид}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} \left\{ y_{\text{м}}(t) - y(t) \right\}^2 \mathrm{d}t \to \min \cdot$$

Аппроксимирующая модель выбиралась из следующего перечня передаточных функций, включая функции дробного порядка [1]:

$$W_{a1}(\mathrm{s}) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau \cdot s}}{(T_1 \cdot s + 1) + (T_2 \cdot s + 1) + (T_3 \cdot s + 1)};$$

$$W_{a2}(\mathrm{s}) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_1 \cdot s^3 + T_2 \cdot s^2 + T_3 \cdot s + 1};$$

$$W_{a3}(\mathrm{s}) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau \cdot s}}{(T_1 \cdot s^3 + 1)^n};$$

$$W_{a4}(\mathrm{s}) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_1 \cdot s^{n1} + T_2 \cdot s^{n2} + T_3 \cdot s^{n3} + 1},$$

где n, $n1$, $n2$, $n3$ — вещественные переменные.

Задача идентификации решалась в частотной области с использованием обратного преобразования Фурье и эволюционного алгоритма оптимизации «Optim-MGA» [2].

Литература

1. **Васильев В.В, Симак Л.А.** Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. Киев, НАН Украины, 2008. — 256 с.

2. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3—4. С. 78—85.

О.С. Рыжков, студ.; рук. Н.И. Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОМЕРНОЙ НЕСВЯЗАННОЙ АСР

В работе выполнен расчет оптимальных параметров многомерной несвязанной АСР численным методом с использованием эволюционного алгоритма «Optim-MGA» [1]. В качестве критерия выбран квадратичный интегральный критерий, имеющий аналитическую связь с настроечными параметрами. Расчет оптимальных параметров многомерной несвязанной АСР проведен для системы с двумя ПИ- и ПИД-регуляторами (рис. 1).

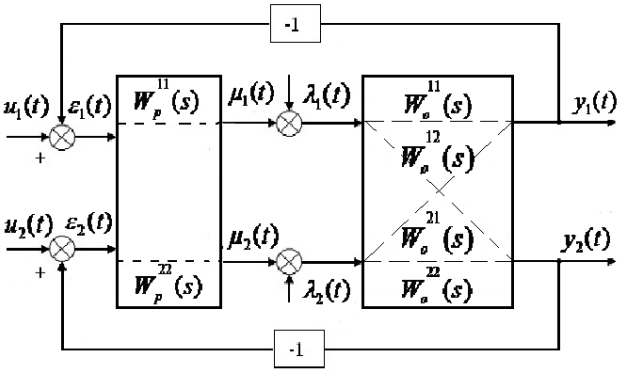


Рис. 1. Структурная схема АСР

Передаточные функции объекта задаются заранее:

$$W_O^{22}(s)=\frac{-3e^{-8\cdot s}}{(99s+1)^2(15s+1)^2};\ W_O^{11}(s)=\frac{2{,}5e^{-6\cdot s}}{(36s+1)^3(10s+1)^2};$$

$$W_O^{21}(s)=\frac{730\,s\,e^{-6s}}{(240s+1)^2(10s+1)^2};\ W_O^{12}(s)=\frac{-2{,}9(46s+1)e^{-8s}}{(38s+1)^3(74s+1)(15s+1)^2}.$$

С помощью предлагаемого метода представляется возможным находить оптимальные настройки с запасом устойчивости по величине заданных показателей колебательности по соответствующим контурам. Вычисления при этом проводятся без использования итерационных процедур, что ускоряет процесс нахождения оптимального решения и увеличивает его точность.

Литература

1. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3—4. С. 78—85.

Г.С. Савельев, асп.; рук. С.В. Мезин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ 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.

При оценке эффективности внедрения необходимо обратить особое внимание на требования модернизации смежных систем, таких как система энергоснабжения оборудования, система автоматизированного управления, система вентиляции и другие. Следует учитывать особенности работы частотного привода с оборудованием тепловых электростанций, наиболее типовыми такими объектами являются: питательные насосы, циркуляционные насосы, дымососы, дутьевые вентиляторы, конденсатные насосы, насосы химического цеха, питатели пыли котлов, питатели сырого угля и др.

При уменьшении электрической нагрузки ТЭС доля расхода электроэнергии на собственные нужды увеличивается. При нагрузке 50 % достигает полуторакратного, а при 30 % — двукратного увеличения. Исследование и опыт работы передовых ТЭС показывает возможность существенного снижения расхода электроэнергии на собственные нужды [1]. Мировая и отечественная инженерная практика показала, что наибольший экономический эффект при реализации программ энергосбережения дает переоснащение энергетических сетей и коммуникаций устройствами частотно-регулируемого электропривода.

Однако большинство современных методик строятся на расчете только экономии электроэнергии при внедрении частотно-регулируемого привода. При этом берется коэффициент экономии энергии, который не основан на исследовании объекта и часто завышен.

Литература

1. **Голоднов Ю.М**. Собственные нужды тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1991.

А.А. Смирнов, студ.; рук. И.А. Болдырев, к.т.н.
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В настоящее время одним из направлений развития энергетики является увеличение доли нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. При этом развитие инновационной энергетики требует решения ряда задач. К ним можно отнести вопросы поиска новых подходов к энергоэффективному управлению комбинациями альтернативных источников энергии.

Исследование проводилось на полигоне нетрадиционных и возобновляемых источников энергии филиала МЭИ в г Волжском. Цель исследования — повышение энергоэффективности комплекса альтернативных источников энергии. Объектом исследования является комплекс подготовки горячей воды (рис. 1). Новизна проведенного исследования заключается в централизованном подходе к управлению комплексом.

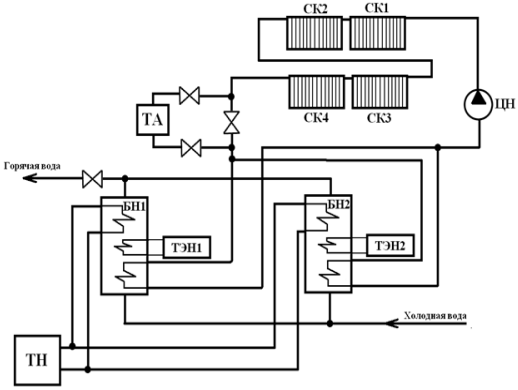


Рис. 1. Комплекс подготовки горячей воды на основе нетрадиционных источников энергии:
СК — солнечный коллектор; ТН — тепловой насос; ТА — теплоаккумулятор; ТЭН — тепловой электронагреватель; БН — бак-накопитель

В результате исследования была получена математическая модель рассматриваемого комплекса, была выявлена зависимость эффективности работы установки от изменения погодных условий. На основе полученных результатов предложен алгоритм управления комплексом альтернативных источников энергии (АИУ) с учетом прогнозируемых изменений погодных условий.

Полученные результаты можно использовать для создания систем управления альтернативными источниками энергии.

С.Д. Хмелюков, студ., рук. Т.Е. Щедеркина, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА СТЕНДЕ ABB FREELANCE 800F

Компания ABB, уже давно и успешно занимающая ведущие места в различных областях промышленности в мире, предлагает перечень уникальных систем, устройств и услуг для нужд всех типов электростанций. Программно-технический комплекс Freelance 800F успешно используется в России на таких объектах, как Ново-Рязанская ТЭЦ (котел ТГМ-151), Невинномысская ГРЭС, Магнитогорский металлургический комбинат, мусоросжигательный завод, насосно-перекачивающие станции г. Москвы и т.д. Имея в своем распоряжении стенд Freelance, на кафедре АСУ ТП есть возможность исследования его функций и работы на нем. Соответственно появляется перспектива более широкого внедрения этой системы в энергетику.

В рамках курса «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» создается цикл лабораторных работ на стенде с аппаратурой Freelance. Динамические характеристики котлоагрегата ТГМП-204 [1], представленные в виде кривых разгона, использованы в работе с целью составления моделей локальных систем регулирования: температурного режима прямоточного котла, экономичности процесса горения, температуры первичного и вторичного пара.

С помощью программных сред Control Builder F и DigiVis. осуществлено моделирование динамических характеристик по температуре и давлению перегретого пара перед турбиной при возмущении расходом топлива и расходом питательной воды. В среде DigiVis регистрируются кривые разгона, с помощью которых определяются параметры объекта регулирования, реализуется функция сигнализации выходных значений параметров АСР при нарушении допустимых пределов, отображаются процессы регулирования на выходе замкнутых систем регулирования.

Проделанная работа может быть основой для подготовки специалистов по автоматизации технологических процессов на базе перспективного программно-технического комплекса Freelance 800F.

Литература

1. **Динамические** характеристики энергоблока 800 МВт с котлоагрегатом ТГМП-204 / М.Б. Койчу, В.Г. Кондратенко, П.С. Перловский, Б.Е. Симкин // Теплоэнергетика. 1976. № 4.

Р.М. Шанин, Е.А. Линтварев, студенты; рук. А.Н. Лесничук, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ (СТД) ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ЭКРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

Исследования работы СТД были проведены на ее имитационной модели, которая написана на языке графического программирования LabVIEW [1]. Программирование сводится к построению структурной схемы приложения в интерактивной графической системе с набором всех библиотечных образов, из которых собираются объекты. На рабочем экране располагаются несколько панелей с управляющими элементами и панели со средствами отображения информации о процессе. Взаимодействие элементов, расположенных на лицевой панели, показано и обеспечивается на блочной диаграмме, которая описывает логику работы данной модели. Выполнение логики работы обеспечивают встроенные функции, которые распределены в библиотеки. Функциональная схема программы условно делится на четыре части, которые выполняются циклично и в строгом порядке, что обеспечивает динамичность процесса. Каждая часть, кроме четвертой, является подструктурой и работает отдельно от остальных, обмениваясь данными между другими подструктурами. Четвертая часть является общей структурой, которая включает в себя все подструктуры, что позволяет работать им в связке и обмениваться данными.

Разработанный алгоритм системы технической диагностики с использованием предлагаемого сигнала, косвенно оценивающего тепловосприятие экранных поверхностей нагрева, состоит в том, чтобы получать на дисплее текущее и интегральное тепловосприятие боковых экранов топки за прошедший с момента выхода котла из ремонта отрезок времени. Он позволяет отслеживать на дисплее положение ядра факела в топке котла, оценивать тепловосприятие экранных поверхностей нагрева в темпе с технологическим процессом как в текущий момент, так и в заданный промежуток времени, используя данные архива (час, сутки и т.д.).

Литература

1. **Оптимизация** процесса горения с использованием сигнала по перепаду давлений на экранах топки прямоточного котла / А.Н. Лесничук, М.Г. Лысков, О.К. Смирнов, Д.Г. Галайда // Труды Международной научной конференции CONTROL-2005. 2005. С. 92—93.

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

РАЗРАБОТКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА НА БАЗЕ ПТК SPPA-T3000

В настоящее время важнейшей задачей, наряду с разработкой новых технических средств является усовершенствование методов управления, логики процесса.

В данной работе согласно основным принципам, изложенным в [2], выбрана наиболее подходящая для регулирования температурой перегретого пара двухконтурная АСР с регулятором и дифференциатором. Обосновано усложнение системы регулирования добавлением второго замкнутого контура (ввиду малоинерционности внутреннего контура). Проведен сравнительный анализ эффективности регулирования температурой перегретого пара одноконтурной и двухконтурной АСР путем сравнения показателей точности и качества регулирования. По результатам сделан вывод о разумности усложнения АСР.

Расчет осуществлен в соответствии с методами и формулами, представленными в [1]. Дважды использован метод многомерного сканирования при нахождении параметров настройки регулятора.

Далее предложена возможная реализации АСР с использованием регулирующего органа и исполнительного механизма отечественного производства и программно-технических средств SPPA-T3000 [3].

К модулю УСО был подключен термопреобразователь сопротивления (ТС), сигнал с которого поступал на вход АСР в качестве случайного возмущающего воздействия и менялся пропорционально температуре помещения, где находился ТС. В сумматоре этот сигнал складывался с сигналом задания, представляя собой некую помеху. В результате эксперимента при подаче на вход АСР ступенчатого воздействия от задатчика на выходе системы наблюдался переходный процесс как реакция на это воздействие, сложенное со случайным.

Разработанная АСР настроена на работу с реальными сигналами, данный вывод сделан на основании проделанной работы. И с некоторыми доработками система могла бы быть использована в качестве автономной АСР на производстве.

Литература

1. **Ротач В.Я**. Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

2. **Плетнев Г.П.** Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. М.: Издательство МЭИ, 2005.

3. **Мезин С.В., Зверьков В.П.** Подготовка и реализация проектов АСУ ТП на базе ПТК SPPA-T3000 фирмы «Сименс». М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Направление

ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

Научный руководитель направления —

директор ЭнМИ, к.т.н.,
профессор С.А. Серков

Секция 48

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИГАТЕЛИ

Председатель секции — директор ЭнМИ, к.т.н., профессор С.А. Серков
Секретарь секции — к.т.н., доцент А.И. Лебедева

А.Д. Водениктов, студ.; рук. А.А. Краснов, асс. (ИГЭУ, г. Иваново)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Эффективность производства электроэнергии газотурбинными энергетическими установками зависит, прежде всего, от степени повышения давления воздуха в компрессоре и температуры газа перед ГТ.

Темп роста жаропрочности материалов проточной части ГТ после 60-х годов значительно уступает росту начальной температуры газа. Основным средством, позволяющим гарантировать надежность работы ГТУ в этих условиях, является создание высокоэффективных систем охлаждения, лопаточного аппарата проточной части ГТ. В подавляющем числе таких систем используется часть циклового воздуха компрессора ГТУ.

Была рассмотрена система воздушного охлаждения, в которой применяется цикловой воздух компрессора, отбираемый из различных отсеков его проточной части.

Расчет системы охлаждения можно условно разделись на следующие этапы.

Гидравлический расчет. При помощи программного комплекса трехмерного моделирования Unigrafics NX были построены плоские сечения рабочей лопатки 1 ступени (периферийное, среднее, корневое) и разработана гидравлическая схема системы охлаждения. С использованием методики расчета систем охлаждения турбин, применяемой на НПО «Сатурн», был выполнен гидравлический расчет рабочей лопатки 1 ступени ТВД.

Тепловой расчет. Для выполнения теплового расчета рабочей лопатки 1 ступени ТВД в программном комплексе ANSYS 9.0 разработана конечно–элементная модель плоских сечений рабочей лопатки 1 ступени ТВД. Плоские сечения выполнены для трех радиусов рабочей лопатки по высоте проточной части: 2 сечения на периферийном радиусе и по одному на среднем и корневом. Тепловой расчет рабочей лопатки выполнен в совместной постановке с гидравлической моделью охлаждения (тепло-

гидравлическая модель). Создание теплогидравлической модели для проведения совместного гидравлического и теплового расчетов заключается в привязке каналов системы охлаждения рабочей лопатки ТВД к элементам твердотельной модели плоских сечений, выполненных в программе ANSYS.

Расчет температурных полей основных деталей турбины и оценка эффективности.

Результаты расчета системы охлаждения позволяют улучшить параметры работы ГТУ.

П.Е. Ганин, студ.; рук. В.И. Голубев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОБОДНО ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА SIMATIC S7-300

В современном машиностроении широкое распространение получили шлифовальные операции. При обработке деталей на плоскошлифовальном станке необходимо выполнение двух условий: поддержание постоянной скорости шлифования, независимой от радиуса расположения обрабатываемой поверхности на столе, и обеспечение постоянной подачи шлифовального круга при продольном перемещении стола. Применение программируемого логического контроллера (ПЛК) для решения этих задач позволяет значительно упростить обычную схему электрогидроавтоматики.

В рассматриваемом в качестве примера станке гидродвигатели должны обеспечивать выполнение следующих функций: регулирование частоты вращения гидромотора, обеспечивающего вращение стола; регулирование скорости гидроцилиндра, осуществляющего продольное движение стола; перемещение и зажим головки шлифовального круга.

В работе рассматривалась возможность управления гидродвигателями станка с помощью ПЛК Siemens Simatic S7-300. Бесступенчатое регулирование скорости гидродвигателей при выполнении операции шлифования, достигалось за счет применения распределителей с пропорциональным электромагнитным управлением, непосредственно соединенных с контроллером. Также для данного типа станка была разработана SCADA — система, позволяющая удаленно управлять его работой, задавать параметры шлифования и получать информацию о работе системы в режиме реального времени. Работоспособность системы числового программного управления была проверена на стенде фирмы Festo, показанном на рис. 1.

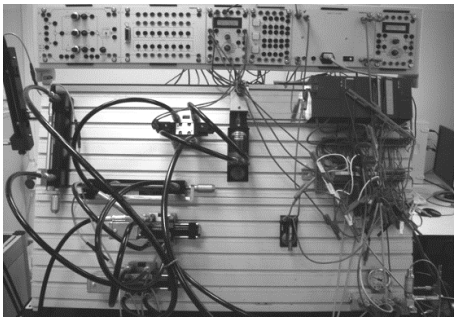


Рис. 1

А.А. Гусев, асп.; рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТПТУ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Математическая модель тепловой схемы ТПТУ для исследования влияния начальных параметров на КПД была реализована в среде MathCAD 15 с использованием программы «WaterSteamPro» для расчета свойств воды и водяного пара.

Турбоагрегат рассматривается не по цилиндрам, а по отсекам. Отсеки в турбоагрегате выбираются из условия постоянства расхода. Именно так построена математическая модель, реализованная в программном комплексе «*THERMOFLOW*». Однако программа «*THERMOFLOW*» достаточно дорога и требует ежегодной платной поддержки лицензии, что и подвинуло авторов на создание собственного программного продукта.

Для расчетов была взята схема ТПТУ Т-250/300-23,5 УТЗ. Было просчитано восемь вариантов схемы. Результаты расчетов мощности и КПД, полученные при помощи созданной математической модели, помечены в табл. 1 индексом «ММ», результаты «*THERMOFLOW*» — индексом «*TF*».

Таблица 1

Результаты расчета тепловой схемы

№	p_0, МПа	t_0, °С	$p_{пп}$, МПа	$t_{пп}$, °С	$t_{пв}$, °С	$N_э$, МВт «*TF*»	$N_э$, МВт «ММ»	КПД «*TF*»	КПД «ММ»
1	23,5	540	3,63	540	265	299,5	303,8	37,9	37,5
2	23,5	565	3,63	560	265	312,1	315,9	38,5	38,0
3	25,0	565	3,63	560	265	312,9	317,3	38,6	38,1
4	25,0	575	4,00	570	270	313,1	317,5	38,8	38,3
5	27,0	585	4,30	580	277	313,5	318,6	39,1	38,7
6	29,0	585	4,30	580	277	314,3	320,1	39,2	38,9
7	29,0	600	4,90	590	282	314,7	321,8	39,5	39,1
8	30,0	600	4,90	600	285	316,2	322,3	39,7	39,3

Проведенная серия расчетов по разработанной математической модели показала, что результаты практически совпадают с аналогичными образцовыми результатами для тех же параметров, полученными при расчетах в программе «*THERMOFLOW*» для блоков Т-250/300-223,5 УТЗ, а полученные при сравнении результаты однозначно свидетельствуют о корректности выбранной математической модели. Незначительное расхождение объясняется принятым несущественным отличием тепловых схем.

А.А. Гусев, асп.; рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «АВАРИЙНЫЕ СИТУАЦИИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ Т-100-12,8 УТЗ»

В электронном учебном пособии при помощи удобного интерфейса ПК (рис. 1) освещены основные вопросы эксплуатации ТПТУ с паровой турбиной Т-100-12,8 УТЗ.

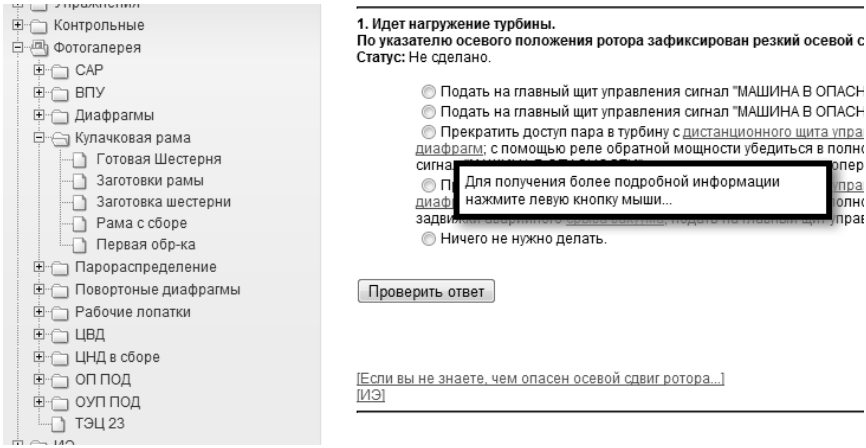


Рис. 1. Вид экрана ПК с главным меню учебного пособия

Рассмотрены основные эксплуатационные параметры и краткая характеристика режимов работы, основные технологические принципы организации режимов пусков и остановов турбины, аварийные ситуации.

В учебное пособие включена фотогалерея турбины и ее основных элементов. Необходимые пояснения к тексту даются всплывающими вставками (см. рис. 1). Кроме того, в состав учебного пособия включен раздел с вопросами для аттестации, позволяющий закрепить полученные знания.

Учебное пособие предназначено для аудиторных занятий со студентами и слушателями курсов повышения квалификации, но может использоваться также для самостоятельного обучения, в том числе для интерактивного обучения слушателей при помощи сети Ethernet.

А.А. Гусев, асп., Т.Н. Кузнецова, студ.; рук-ли С.С. Дмитриев, к.т.н., доц., Б.Н. Петрунин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

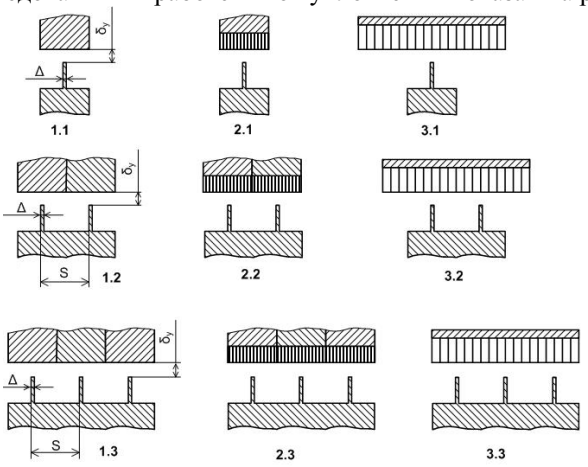
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕИСТЫХ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Конфигурация прямоугольно-ячеистых уплотнений аналогична конфигурации сотовых, только ячейки (соты) — прямоугольные или квадратные с диаметром вписанной окружности $d_я$.

Прямоугольно-ячеистые уплотнения могут выполняться с различными шагами по оси и по радиусу и с разными наклонами боковых стенок ячеек.

Прямоугольно-ячеистые статорные части могут использоваться как в прямоточных уплотнениях, так и в уплотнениях с полным гашением скорости.

Вид исследованных в работе типов уплотнений показан на рис. 1.



1 — гладкий статор;

2 — сотовый статор с шестиугольной ячейкой, $d_я$ = 0,9 мм;

3 — сотовый статор с квадратной ячейкой, $d_я$ = 4,0 мм

Рис. 1. Вид исследованных типов уплотнений

Предварительные продувки показали, что при $d_я$ = 3 мм квадратно-ячеистые уплотнения аналогичны сотовым по расходным и силовым характеристикам.

При сравнении с традиционными уплотнениями при $d_я > 4$ мм квадратно-ячеистые уплотнения такие же (или несколько лучше), но неконсервативные возмущающие силы у них на 70—80 % ниже, чем у традиционных.

М.Н. Зайченко, асп., А.А. Котова, студ.; рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА

Одним из основных способов снижения эмиссии оксидов азота (NO_x) является применение внутритопочных мероприятий. Это связано с тем, что, во-первых, именно в объеме топки происходит образование NO_x, во-вторых, их применение возможно без ухудшения технико-экономических показателей оборудования и его надежности.

Стадийно-ступенчатое сжигание является одним из основных внутритопочных мероприятий и подразумевает организацию четко выраженных стадий горения топлива с различными условиями по избыткам воздуха, интенсивности перемешивания, времени пребывания, температурам и т.д. Несмотря на широкое применение такого способа сжигания до сих пор не известны значения оптимальных режимных параметров, при которых бы достигался минимум эмиссии оксидов азота.

Для определения оптимальных режимных параметров стадий горения в данной работе используется пакет прикладных программ «РОСА», разработанный на кафедре ПГС для решения временных задач химической кинетики процесса горения, расчета эмиссии оксидов азота, серы, углерода и т.д. [1]. Данная программа позволяет моделировать внутритопочные процессы, исследовать влияние на эмиссию NO_x и других вредных веществ как отдельных режимных параметров, так и их совокупности. В программе описывается кинетика реагирования не только горючих компонентов и конечных продуктов сгорания, но и промежуточных реагентов, участвующих в цепных реакциях горения, что позволяет отслеживать вклад отдельных реакций.

Чтобы определить режимные параметры, обеспечивающие минимальные выбросы NO, следует рассматривать их отдельно друг от друга. Это позволит наилучшим образом оценить влияние каждого параметра стадии на рассматриваемый механизм образования оксидов азота, что даст возможность четко определить необходимые условия минимальной эмиссии оксидов азота. При этом нужно учитывать тот факт, что минимальное значение NO в конце стадии не обязательно является оптимальным для подавления эмиссии NO при протекании дальнейших стадий.

Литература

1. **Росляков П.В.** Разработка теоретических основ образования оксидов азота при сжигании органических топлив и путей снижения их выхода в котлах и энергетических установках. Дис. … докт. техн. наук. М., МЭИ, 1993.

И.П. Зорин, студ.; рук. В.Г. Грибин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ЧВД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD КОДА NUMECA

К настоящему времени разработано большое число программных пакетов по моделированию течения в турбинных решетках. Данные пакеты позволяют учитывать характер задачи, конструктивные особенности решетки и режим течения. Использование программ вычислительной газодинамики является альтернативой дорогостоящим экспериментам и дает полное представление о происходящих процессах.

В лаборатории оптико-физических исследований (ЛОФИ) кафедры ПГТ НИУ «МЭИ» в настоящее время начинается применение программного комплекса NUMECA. Данный программный пакет позволяет легко построить сетку, провести CFD расчет и обработать полученные результаты. Кроме того, это программный комплекс применим для расчета как ступени, так и цилиндра в целом [1].

Целью настоящей работы являлось освоение программного комплекса NUMECA, изучение основных возможностей по построению сетки, проведения расчета и обработки его результатов. В качестве базы для исследования была использована кольцевая сопловая решетка с профилем С-90-15А. В результате расчета были получены распределения скоростей и углов в среднем сечении вдоль шага решетки на расстоянии 10 % от хорды за выходной кромкой, построены распределения давлений по обводу профиля, распределения чисел Маха. Также по полученным результатам CFD расчета был построен треугольник скоростей, который практически совпадает с треугольником, полученным при тепловом расчете [2].

Анализ полученных результатов свидетельствует о верной постановке задачи, правильном задании граничных условий и корректной работе расчетного алгоритма программного комплекса. В дальнейшем предполагается использовать CFD код NUMECA для расчета ступени и ЦВД паровой турбины.

Литература

1. **Crosh E.A., Haldeman C.W., Dunn M.G., Holmes D.G., Mitchell B.E.** Investigation of turbine shroud distortions on the aerodynamics of a one and one-half stage high-pressure turbine // Journal of turbomachinery. 2011. Т. 133. No 3.

2. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. М.: Энергоатомиздат, 1993.

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДАЕМОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НА ВЕЛИЧИНУ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ

Большая часть современных газотурбинных установок сооружается с применением системы воздушного охлаждения элементов газовой турбины. При этом появляются дополнительные потери, связанные с множеством сопутствующих факторов. Поэтому актуальной задачей является анализ влияния отдельных параметров системы охлаждения газовой турбины на величину дополнительных потерь, вызванных охлаждением.

В работе исследовано влияние следующих факторов: общего расхода охлаждающего воздуха, угла выхода охлаждающего воздуха из перфорационных отверстий (β), места выхода охлаждающего воздуха на профиле лопатки, отношения расходов охлаждающего воздуха на конвективное и перфорационное охлаждение. Применена методика расчета дополнительных потерь в охлаждаемой газовой турбине, где в качестве исходных соотношений для вывода приняты основные уравнения аэродинамики, составленные для элемента межлопаточного канала.

Все расчеты проведены для конкретного профиля сопловой решетки с заданными начальными параметрами газа. Предварительный анализ показывает, что дополнительные потери в решетке при изменении относительного расхода охлаждающего воздуха от 0 до 0,10 возрастают почти на 4 %. В диапазоне угла β от 0 до 30° практически не происходит изменения коэффициента потерь в решетке, однако общее увеличение коэффициента потерь при росте угла выхода воздуха от 0 до 90° составляет около 2 %.

Из сравнения перфорационного и пленочного охлаждения следует, что коэффициент потерь минимален в случае отсутствия перфорационного охлаждения. С увеличением количества воздуха, выдуваемого из перфорационных отверстий, растут и суммарные потери, т.е. перфорационная составляющая потерь значительно превышает конвективную составляющую. В случае, исследованном в данной работе, коэффициент потерь в решетке увеличивается более чем на 4 % при переходе от конвективного к пленочному охлаждению при сохранении постоянного общего расхода охлаждающего воздуха. Полученные результаты могут быть интересны и важны для дальнейшего детального расчета охлаждаемой газовой турбины.

Ю.И. Качан, Е.А. Рябцев, студенты; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТА КОНДЕНСАТНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА ГИГАВАТТНОГО КЛАССА

Излагается инновационное, по нашему мнению, и перспективное проектное решение для подсистемы конденсатных насосов питательной системы (ПС) супермощного энергоблока. Приведенное конструкторское решение в виде агрегата конденсатных насосов (АКН) направлено на дальнейшее повышение энергоэффективности и надежности ПС в целом [1].

Данный вариант агрегата направлен на решение двух важнейших задач:

- создание напора, обеспечивающего эффективное функционирование деаэратора и бескавитационную работу бустерного насоса (БН);
- выполнение требования к собственным предельно высоким всасывающим способностям АКН при сохранении вполне приемлемого уровня КПД.

АКН включает два вертикальных осевых насоса первого подъема КН1, а также один горизонтальный осевой насос второго подъема КН2, при этом рабочие органы (совокупности рабочих колес и направляющих аппаратов) являются нетрадиционными. Рабочие органы являются трехрядными («многовенцовыми») с мультипланной системой решеток. Такое решение прогнозно позволит обеспечить снижение неравномерности потока по вылету лопасти и оптимизировать параллельное функционирование рабочих органов каждого венца решеток.

При разработке АКН были выполнены:

- обзор конденсатных насосов, включающий в себя анализ как типовых конструкций, так и известных научных разработок;
- определение геометрических параметров конструкции насосов первого, второго подъемов и агрегата в целом, включая лопастные системы;
- оптимизацию формы профилей учетом недоворота потока методом последовательного приближения в процессе многовариантного решения прямой трехмерной гидродинамической задачи для лопастных систем [2].

Литература

1. **Моргунов Г. М.** Насосы питательных систем для энергоблоков гигаваттного класса // Насосы и оборудование. 2012. № 1. С. 44—49.

2. **Моргунов Г.М.** Расчет безотрывного обтекания пространственных лопастных систем с учетом вязкости // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 1. С. 117—126.

А.А. Кремлев, студ.; рук. Л.Д. Яблоков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ТУРБИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПЕРЕВОДА КОТЕЛЬНЫХ В МИНИ–ТЭЦ

Анализ современных тенденций в энергетике указывает на переход от централизованной к распределенной мини-микрогенерации, максимально приближенной к окончательному потребителю, как на общемировую тенденцию. Очень привлекательной с экономической и экологической точки зрения выглядит схема когенерации, т.е. одновременной выработки тепла, электроэнергии (а иногда еще и холода). В России дополнительными аргументами в пользу внедрения технологии когенерации на существующих котельных служит то обстоятельство, что в условиях спада производства большинство паровых отопительных и пароводогрейных промышленных и промышленно отопительных котельных не используют полностью установленные мощности. Номинальные параметры свежего пара на этих котельных P_0 = 1,4; 2,4; 4 МПа. В этих условиях логично превращение существующих котельных в ТЭЦ малой мощности.

Мини-ТЭЦ могут базироваться на котельных небольшой мощности, что особенно важно для городов с численностью населения до 100 тыс. человек. Достаточно эффективной технологией преобразования таких котельных в мини-ТЭЦ являются паровые турбины. До 80 % в этих котельных установлены котлы ЗАО ПО «Бийскэнергомаш» производительностью от 2,5 до 25 т/ч помимо этого, в странах СНГ находится достаточно большое количество котлов этой марки.

Развитие распределенной электрической системы, состоящей из множества преимущественно мелких источников, находящихся непосредственно у потребителей, обеспечит дополнение и резервирование системы централизованного энергоснабжения. При этом потребитель, обладающий собственным источником энергии (мини-ТЭЦ на базе собственной котельной), во-первых, получает ее по себестоимости, которая в разы ниже имеющихся тарифов, во-вторых, повышает надежность энергоснабжения, в-третьих, может получить дополнительные выгоды от продажи электроэнергии; в-четвертых, снижает пиковые нагрузки на ТЭС, что приведет к увеличению срока службы оборудования ТЭС; в-пятых, может максимально использовать недорогое местное топливо.

В материалах доклада представлен проект радиальной турбины малой мощности с новыми технологическими решениями и дана сравнительная оценка с турбинами малой мощности, производимыми в России и за рубежом.

С.Ю. Купцов, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПОДВОДЯЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ ДЛЯ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Подводящее устройство предназначено для организованного подвода жидкости к рабочему колесу насоса с наиболее равномерной осесимметричной эпюрой скорости и минимальными гидравлическими потерями. В современных насосных агрегатах применяются подводящие устройства рабочей жидкости двух типов: осевые и боковые.

Осевые подводы обеспечивают наиболее благоприятные условия (с точки зрения возникновения кавитации) для работы насосного агрегата, но они применимы в конструкциях, где рабочее колесо выполнено без проходного вала. В многоступенчатых насосах и насосах двустороннего действия находят применение боковые подводы. Яркими представителями таких подводов являются кольцевые и полуспиральные. Как показывают исследования [1, 2] и опыт проектирования, эти устройства не обеспечивают равномерной эпюры скорости и давления на входе в рабочее колесо, тем самым снижают его антикавитационные и виброшумовые свойства. Отмеченные недостатки усугубляются на нерасчетных режимах работы. Кроме того, проектирование и производство таких подводов (в частности, полуспирального) требует большого количества времени и высокой квалификации специалистов.

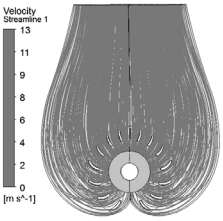


Рис. 1. Эвольвентный подвод

Обозначенные проблемы предлагается решить путем применения подводов с эвольвентной образующей (рис. 1). Расчетно-теоретические исследования показывают, что эпюра скорости и давления на входе в рабочее колесо остается равномерной и осесимметричной в широком диапазоне подач. Поток жидкости в подводе ведет себя равномерно и упорядоченно. Предполагается, что применение подвода с эвольвентной образующей позволит улучшить антикавитационные свойства насоса, продлить срок его службы и удовлетворить более жестким требованиям по шумовым характеристикам.

Литература

1. **Купцов С.Ю., Моргунов Г.М.** Исследование рабочего процесса подводящих устройств насосных агрегатов. Свойство эвольвенты // Восьмая международн. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 1, ч. 1. Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ, 2013. С. 116—119.

2. **Моргунов Г.М.** Совершенствование основного насосного оборудования в мощных теплоэнергетических установках // Теплоэнергетика. 2010. № 12. С. 45—53.

Н.А. Ларин, студ.; рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПРИ УСТАНОВКЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТИН В ДИФФУЗОРНОМ КАНАЛЕ С ПОВОРОТОМ ПОТОКА НА 90°

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

Для ликвидации этой застойной зоны и выравнивания поля скоростей внутри канала, как это показано на рис. 1, устанавливались перфорированные пластины с круглыми и квадратными отверстиями, показанные на рис. 2. Пластина № 2 имела степень перфорации, равную 0,535, а пластина № 6 — 0,681.

Были проведены исследования по поиску оптимального места установки пластин в канале и выявлено оптимальное расположение пластины внутри канала.

Пластины устанавливались таким образом, что часть канала, прилегающая к нижней отклоняющейся стенке, была свободна. Сделано это было потому, что вблизи именно этой стенки в выходном сечении формировалась обширная застойная зона, и дополнительное затенение канала привело бы только к еще худшим последствиям.

Как видно из рис. 3, установка пластин приводила к практически полной ликвидации застойной зоны в выходном сечении и заметному выравниванию выходного поля скоростей. При этом установка пластины № 2 оказалась предпочтительнее пластины № 6, так как в этом случае поле скоростей выравнивалось в большей степени.

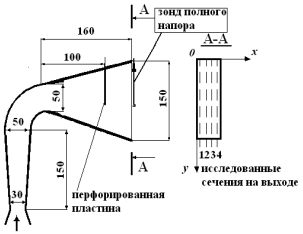


Рис. 1. Вид исследованного канала

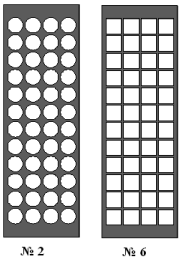


Рис. 2. Вид перфорированных сеток

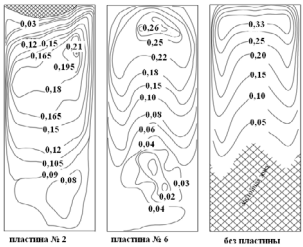


Рис. 3. Выходное поле скоростей при установке пластин

М.М. Левина, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОТЕЛ Е-160-3,9-440ГМ ДЛЯ ГЭС-1 «МОСЭНЕРГО»

На ГЭС-1 ОАО «Мосэнерго» до сих пор работают три котла довоенной постройки фирмы «Babcok» паропроизводительностью 105 т/ч, которые уже давно устарели. Поэтому их замена на новое, отвечающее современным требованиям оборудование является одной из приоритетных задач «Мосэнерго».

Новизна создания замещающего котла заключается в том, что к нему предъявляется ряд дополнительных требований:

- увеличение паропроизводительности со 105 до 160 т/ч;
- обеспечение рабочего диапазона нагрузок в пределах 30—100 % и КПД при сжигании газа на номинальной нагрузке не менее 94 %;
- достижение концентрации оксидов азота не выше 90 мг/м^3 при сжигании природного газа;
- сохранение несущих конструкций и архитектурных особенностей здания, что ограничило компоновочные решения по котлу;
- проведение монтажа котла без вывода из эксплуатации расположенного рядом станционного оборудования;
- на первом этапе эксплуатации котел должен работать с пониженными параметрами пара, с паропроизводительностью не более 145 т/ч, при этом КПД котла не ниже 93,3 %.

Необходимость создания малогабаритного котла с высоким КПД предопределила принятие следующих решений:

- нетрадиционная горизонтальная П-образная компоновка котла;
- газоплотное исполнение котла, применение цельносварных панелей;
- выполнение конвективных поверхностей нагрева мембранными или со спирально-ленточным оребрением в зависимости от уровня температур газов;
- высокая тепловая форсировка топочного процесса, использование рециркуляции газов в топку и двухступенчатого сжигания.

Автором выполнены расчеты топочного процесса и тепловые расчеты котла, подтвердившие возможность работы в требуемом диапазоне нагрузок при выполнении экологических ограничений и требований экономичности как на первом этапе эксплуатации, так и при работе с проектными параметрами перегретого пара. Кроме того, автором проведена конструктивная проработка экономайзера и водо-воздушного теплообменника.

Полученные результаты используются ОАО «ИК «ЗИОМАР» при разработке рабочего проекта замещающего котла Е-160-3,9-440ГМ для котлов № 4, 5 ГЭС-1 ОАО «Мосэнерго».

А.К. Лямасов, асп.; рук. Б.М. Орахелашвили, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА И БЕЗКАВИТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ПОВЫШАЮЩЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

Конструкция и методика проектирования гидродинамической повышающей передачи (ГДП) считаются известными и рассмотрены в [1].

Передача мощности в ГДП возможна при обеспечении в круге циркуляции необходимых условий, поскольку из-за потерь в лопастных системах турбинного насосного и реакторного колес возможно возникновение кавитации и вскипания жидкости. Поэтому необходимо проектирование узлов питания и охлаждения.

Давление питания выбирается так, чтобы минимальное давление в проточной части было больше давления парообразования

$$p_{\text{подп}} \geq \varphi p_{\text{п}},$$

где φ — коэффициент запаса, который принимают 1,2÷1,4; $p_{\text{п}}$ — давление насыщенных паров рабочей жидкости. Для повышающих ГДП зона наименьшего давления соответствует выходу из турбинного колеса.

Расчет возможного отвода теплоты от поверхности ГДП свободной конвекцией в предположении, что все потери переходят в тепло, показывает, что для обеспечения теплового баланса необходима разница температур с окружающей средой, не соответствующая нормальным условиям. Для решения вводится дополнительный контур охлаждения, представляющий собой теплообменник поверхностного типа. Расход жидкости в этом контуре можно обеспечить как имеющимся перепадом давления между выходом из насосного колеса ГДП и полостью под кругом циркуляции, так и специальным насосом. В качестве охладителя теплообменника можно использовать внешний водяной контур или принудительную подачу воздуха от вентилятора. Применение ГДП на малых ГЭС, а также то, что установка вентилятора предпочтительнее на быстроходном выходном валу и способствует изменению характеристик гидромашины, способствует выбору водяного охладителя.

В качестве технического решения предлагается подключение к ГДП нагнетательного бачка, который применяется для подачи затворной жидкости к торцевым уплотнениям, и может сочетать в себе как функцию создания подпора, так и функцию охлаждения с целью обеспечения теплового баланса.

Литература

1. **Лямасов А.К.** Проектирование повышающей гидродинамической передачи // Современные проблемы науки и образования: Электронный журнал. 2013. № 3. http://www.science-education.ru/109-9364.

Д.А. Молчанов, асп.; рук. И.Л. Майков, д.ф.-м.н., в.н.с. (ОИВТ РАН)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТООТДАЧИ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В настоящее время углеводородное топливо является основным источником получения энергии. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии развиваются, но темпы их развития и внедрения в общую энергосистему не позволят полностью и в короткие сроки заменить традиционные топлива. При этом запасы ископаемых топлив ограничены, а их потребление продолжает расти. Таким образом, остро стоит вопрос увеличения производительности месторождений.

Целью данной работы является разработка установки по увеличению компонентоотдачи газоконденсатного пласта. Выбран способ повышения пластового давления путем заводнения пласта как наиболее эффективный [1].

Энергоагрегат, приводящий в действие насос, должен удовлетворять следующим требованиям:

- хорошим пусковым качествам в условиях низких температур;
- небольшим массогабаритным характеристикам для облегчения доставки в труднодоступные местности;
- возможности работы в условиях частых пусков-остановок;
- автономности.

Перечисленными характеристиками обладает газотурбинный двигатель [2]. Он вместе с редуктором и насосом включается в уже существующую схему добычи газоконденсата, которая состоит из скважины, запорной арматуры и блока низкотемпературной сепарации [3].

В ходе работы исследовались физико-химические свойства газоконденсатных смесей, проводились исследования волновых воздействий на модельную смесь метан-пентан на стендовой установке «Пласт» ОИВТ РАН. Результаты экспериментов согласуются с математической моделью двухфазных течений углеводородных смесей в пористых средах, разработанной в ОИВТ РАН.

Литература

1. **Мирзаджанзаде А.Х., Басниев К.С.** Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003. — 880 с.

2. **Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П.** Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М.: Машиностроение, 1977. — 447 с.

3. **Вяхирев Р.И., Гриценко А.И.** Разработка и эксплуатация газовый месторождений. М.: Недра, 2002. — 880 с.

И.В. Морозов, асп.; рук-ли П.В. Росляков, д.т.н., проф., И.Л. Ионкин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА РАССЕИВАНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Выбрасываемые в атмосферу продукты сгорания органических топлив содержат различные вредные токсичные вещества. Для улучшения рассеивания и снижения концентраций вредных веществ на уровне дыхания людей используют дымовые трубы [1]. При реализации конденсерной установки [2] происходит изменение параметров дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу. Значительно снижается их объем, температура, влажность и содержание основного токсичного компонента при сжигании природного газа — оксидов азота. Все эти факторы оказывают влияние на рассеивание продуктов сгорания в атмосфере. В связи с этим одной из важных задач при проектировании конденсерной установки является оценка влияния указанных выше факторов на изменение значений приземных концентраций загрязняющих веществ.

Такая оценка в данной работе проводилась расчетным способом с помощью унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) «Эколог», разработанной фирмой «Интеграл» для ТЭЦ МЭИ с учетом реальной застройки района Лефортово [1]. В расчетах учитывалось, что при реализации конденсерной установки температура дымовых газов снизится до 45 °С, концентрация оксидов азота сократится в 2 раза, а скорость продуктов сгорания в устье трубы за счет уменьшения диаметра возрастает приблизительно в 1,5 раза.

Анализ полученных результатов показал:

- реализация конденсерной установки не приведет к повышению приземных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере на прилегающей к ТЭЦ МЭИ территории;
- максимальные значения приземных концентраций NO_2 на прилегающей к ТЭЦ МЭИ территории при реализации конденсерной установки снизятся с 0,81 до 0,54 величины ПДК.

Литература

1. **Внедрение** автоматизированной системы непрерывного контроля и регулирования вредных выбросов на учебно-экспериментальной ТЭЦ МЭИ / П.В. Росляков, Л.Е. Егорова И.Л., Ионкин, Д.А. Лахов // ЭНЕРГО 2012: Тр. Всерос. конф. М.: МЭИ, 2010. Т. 2.

2. **Конденсерная** технология утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов / Б. Луннинг, И.Л. Ионкин, А.В. Рагуткин, П.М. Сверчков // ЭНЕРГО 2012: Тр. Всерос. конф. М.: МЭИ, 2012. Т. 2.

И.В. Морозов, асп., В.В. Сухов, студ.; рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МОНИТОРИНГА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ТЭЦ МЭИ

В связи с развитием новых технологических процессов и вводом современных, более жестких экологических нормативов в последние годы в разных странах все более активно разрабатываются и внедряются системы непрерывного контроля (мониторинга) вредных выбросов (СНМВ) ТЭС в атмосферу.

В рамках программы развития Национального исследовательского университета «МЭИ» кафедра парогенераторостроения внедрила на учебно-экспериментальной ТЭЦ университета систему контроля и мониторинга вредных выбросов. Можно выделить три крупные цели внедрения этой системы:

- научную (проведение исследовательских работ на действующем оборудовании, наладка и апробация экологически чистых режимов сжигания топлива, расчет рассеивания вредных выбросов);
- производственную (мониторинг рабочих характеристик оборудования и контроль вредных выбросов, создание баз данных по необходимым характеристикам, автоматическое формирование отчетов (2ТП воздух), автоматическое регулирование рабочих процессов);
- учебную (проведение лабораторных работ на действующем оборудовании, предоставление доступа студентам к учебным ресурсам, связанным с близкими курсами).

В рамках программы НИУ в совместном проекте кафедр парогенераторостроения и инженерной экологии и охраны труда (ИЭиОТ) на территории МЭИ планируется установить несколько метеорологических станций для измерения температуры, давления, влажности атмосферного воздуха, а также концентрации присутствующих в нем вредных веществ. Установленные станции будут интегрированы в СНМВ ТЭЦ МЭИ, а полученная информация будет передаваться в базу данных системы мониторинга ТЭЦ МЭИ и использоваться для оценки качества атмосферного воздуха и построения картины рассеивания вредных выбросов от трубы ТЭЦ МЭИ.

Современный уровень развития техники и технологии, а также уровень антропогенного влияния на окружающую среду привели к необходимости информирования населения о достижениях техники и промышленности. Предлагаемая система решает также информационную задачу — доведение информации до населения о принципах работы ТЭЦ и уровня влияния ТЭЦ МЭИ на окружающую среду.

Е.И. Носенко, студ.; рук. Ю.Ю. Зуев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассматриваемый объемный гидропривод с частотным управлением (ОГП-ЧУ) состоит из насоса постоянной подачи, приводящегося во вращение от асинхронного электродвигателя (АЭД) с частотным преобразователем (ЧП), гидроаппаратуры и гидродвигателя (обычно гидромотора). По критерию энергосбережения ближайшим конкурентом данному приводу является ОГП с машинным (прежде всего, насосным) управлением (ОГП-НУ), в составе которого используется более дорогостоящий и сложный насос переменной подачи, приводимый во вращение от АЭД с постоянной частотой вращения вала.

Анализ публикаций по тематике ОГП-ЧУ показывает, что широте диапазона бесступенчатого регулирования скорости, КПД, зоне нечувствительности и другим показателям статических (регулировочных и энергетических) характеристик ОГП-ЧУ практически не имеет преимуществ перед серийно выпускаемыми традиционными ОГП-НУ.

В то же время имеется информация о том, что по динамическим показателям ОГП-ЧУ имеет преимущество по сравнению с ОГП-НУ, где изменение подачи насоса осуществляется от маломощного электрогидравлического механизма управления (ЭгМУ), дальнейшие возможности форсирования которого практически исчерпаны. Существующие публикации по динамике ОГП-ЧУ крайне немногочисленны и касаются лишь отдельных аспектов нестационарного состояния привода зачастую при отсутствии описания объектов и методов исследования.

В работе проанализированы структуры и сформирован ранжированный по степени сложности ряд математических моделей ОГП-ЧУ, начиная от исходной нелинейной модели и до линейного варианта ненагруженного привода. На основании данных моделей выполнен анализ различных факторов и рекомендована расчетная модель привода для решения прямых и обратных задач. Выполнен расчет динамических характеристик модели и показано влияние различных параметров на динамическое качество — быстродействие, точность отработки приводом входного информационного сигнала, динамическую и статическую жесткость.

Результаты работы будут использованы при построении и реализации алгоритмов скалярного и многокритериального синтеза ОГП-ЧУ для различных условий применения привода в составе технических объектов.

М.Л. Носенко, студ.; рук. Ю.Ю. Зуев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И РАЗРАБОТКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПОЛНЕНИЙ БЛОКОВ ЭНЕРГОНАКОПЛЕНИЯ-РЕКУПЕРАЦИИ В ОБЪЕМНОМ ГИДРОПРИВОДЕ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности и энергосбережения в гидроприводостроении является разработка и внедрение объемных гидроприводов (ОГП) с приводящими асинхронными электродвигателями (АЭД), скорость вращения вала которых регулируется с помощью частотного преобразователя (ЧП). Помимо известных положительных особенностей такого ОГП с частотным управлением (ОГП-ЧУ) привод имеет ряд недостатков, одним из наиболее существенных считается сравнительно низкое быстродействие, обусловленное достаточно высокой инерционностью ротора АЭД.

Улучшение динамических характеристик ОГП-ЧУ возможно за счет применения энергоемкого пневмогидравлического аккумулятора (ПГА), который способен выполнять функции накопителя гидравлической энергии от насоса привода в периоды малого энергопотребления, а также рекуператора энергии, запасающего гидравлическую энергию при работе ОГП-ЧУ с сопутствующими (так называемыми отрицательными) нагрузками.

В работе:

- выполнен анализ нестационарных (разгонных и тормозных) режимов работы ОГП-ЧУ, в том числе при наличии препятствующей и сопутствующей нагрузок на выходном звене;
- предложены схемы и возможные технические реализации блоков энергонакопления-рекуперации с использованием ПГА и серийной гидроаппаратуры;
- составлена таблица нестационарных состояний привода в энергонакопительных, рекуперативных и штатных режимах работы;
- сформирован перечень критериев и частных показателей для оценки функциональной пригодности и конкурентоспособности системы рекуперации с учетом технических, эксплуатационных и экономических факторов;
- представлен укрупненный алгоритм решения задачи моделирования, исследования характеристик и расчета блоков энергонакопления-рекуперации ОГП-ЧУ.

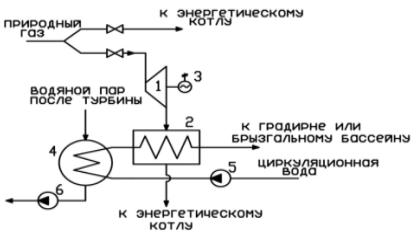
Результаты работы будут использованы в дальнейших исследованиях по указанной тематике.

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

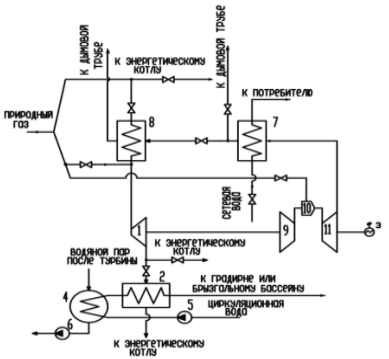
ТУРБОДЕТАНДЕРНАЯ СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ НА КОНДЕНСАЦИОННЫХ БЛОКАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС

Рассматривается проблема снижения теплового загрязнения окружающей среды циркуляционной водой энергоблоков ТЭС.

Для решения этой проблемы предлагаются две принципиально новых системы утилизации бросовой теплоты циркуляционной воды энергоблока ТЭС. Эти две системы (рис. 1) работают на базе турбодетандерной установки [1], состоящей из турбодетандера *1* и охладителя циркуляционной воды 2. Природный газ поступает в турбодетандер, где расширяется и вырабатывает полезную работу, при этом охлаждается до минус 50—70 °С. Для возврата первоначальной температуры 0—5 °С, газ поступает в охладитель циркуляционной воды *2*, в котором происходит передача тепловой мощности от воды к газу. При первом варианте использования (рис. 1, *а*) турбодетандер передает мощность электрогенератору. Отличие второго варианта (рис. 1, *б*) в том, что турбодетандер вращает ротор компрессора газотурбинной установки.



а)



б)

Рис. 1. Система утилизации теплоты циркуляционной воды:
а — первый вариант; *б* — второй вариант; *1* — турбодетандер, *2* — охладитель, *3* — электрогенератор, *4* — конденсатор, *5* — циркуляционный насос, *6* — конденсатный насос, *7* — сетевой подогреватель воды, *8* — подогреватель магистрального газа, *9* — воздушный компрессор, *10* — камера сгорания, *11* — газовая турбина

Литература

1. **Охотин В.С.** Термодинамический анализ детандер-генераторных агрегатов (ДГА) в схеме паротурбинных установок с подогревом газа паром из турбины // Вестник МЭИ. 2004. № 4. С. 34—40.

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

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ДЫМОГАРНЫХ ТРУБ ДЛЯ ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ И ИХ РЕШЕНИЯ

Жаротрубные котлы нашли широкое применение в легкой и пищевой промышленности, сфере ЖКХ. Они обладают легкостью монтажа, простотой эксплуатации и ремонта, малыми размерами и мобильностью. К отрицательным особенностям подобных котлов относятся увеличение габаритов с ростом мощностей, невысокая надежность работы ввиду особенностей конструкции. Данная работа посвящена изучению проблем надежности работы дымогарных котлов (список основных причин выхода жаротрубных котлов из строя представлен в табл. 1) и способам их решения.

Таблица 1

Основные причины выхода жаротрубных котлов из строя

Паровые котлы	Водогрейные котлы
Эксплуатационные	
Неправильная настройка горелочного устройства	
Несоблюдение норм по качеству воды	
	Образование конденсата в дымогарных трубах
Конструкционные	
Отложение солей жесткости в области жаровой трубы	
Регулирование влажности пара при изменении расхода пара	Пристенное кипение около жаровой трубы
Застаивание шлама при регулярной продувке. Образуются зоны, в которых удаление шлама не выполняется	
Выход из строя труб 2 и 3 контура из-за температурных расширений	
Технологические	
Некачественные сварные швы в трубной доске	

Эксплуатационные причины напрямую зависят от уровня качества монтажа и наладки оборудования, и решения этих проблем носят больше рекомендательный характер. Технологические связаны с соблюдением технологии сборки на предприятии. В большей степени будут рассматриваться конструкционные причины выхода котлов из строя.

В.В. Попов, асп.; рук-ли В.Г. Грибин, д.т.н., проф.;
А.А.Тищенко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ И ПРОЦЕССА ЕЕ СЕПАРАЦИИ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ

Повышение надежности и экономичности проточных частей паровых турбин является одним из основных путей улучшения эффективности выработки электроэнергии. Большой запас увеличения этих параметров лежит в области последних ступеней ЦНД и проточных частей влажнопаровых турбин [1]. При проектировании этих элементов 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 [2]. Этот способ весьма эффективен с точки зрения уменьшения количества крупных капель в потоке и, как следствие, уменьшения эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток [3]. 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 связи с этим в рамках настоящей работы была 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. В процессе моделирования применялись разработанные в лаборатории ЛОФИ модификации конвейера расчета CFD кода, реализующие математические модели описания течения влажнопаровых потоков. Полученные данные позволили подробно исследовать процесс формирования пленки, характер и структуру ее течения. Кроме того моделирование истечения пленки в сепарационную щель, расположенную на поверхности лопатки, обеспечило более полное представление о процессах, происходящих вблизи места сепарации. Также были выявлены особенности влияния отсоса пленки на газодинамические характеристики сопловых каналов в целом. Применение данной методики в перспективе позволит ускорить работу по созданию профилей сопловых лопаток и выбору оптимального расположения на них сепарационных щелей.

Литература

1. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.

2. **Грибин В. Г., Коршунов Б. А., Тищенко А. А.** Исследование внутриканальной сепарации влаги в турбинных сопловых решетках // Теплоэнергетика. 2010. № 9.

3. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.

И.Ю. Сорокин, асп.; рук. В.Г. Грибин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА ЗА ПЛОСКОЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКОЙ

При конструировании последних ступеней конденсационных турбин, а также проточных частей турбин АЭС для получения высоких показателей эффективности и надежности необходимо учитывать особенности течения влажного пара. Наличие двухфазной среды в проточной части влечет за собой ряд негативных явлений, которые, по возможности, необходимо минимизировать.

К настоящему времени накоплен огромный опыт в области исследований газодинамики двухфазных сред. Поскольку глубина проведенных исследований в этом направлении себя не исчерпала, существует необходимость в проведении экспериментальных работ. На сегодняшний день не существует универсального метода, позволяющего в полном объеме получать основные характеристики двухфазной среды. Поэтому разработка новых методов остается актуальной задачей в настоящее время.

Активное развитие экспериментальных и расчетных методик исследования позволило принципиально по новому подойти к изучению течения влажного пара. Так, на кафедре ПГТ (НИУ «МЭИ») хорошо себя зарекомендовал кросскорреляционный метод лазерной диагностики PIV, позволяющий определить мгновенные поля скоростей. Изменение скорости частиц вдоль их траекторий несет в себе информацию о размерах капель, что позволило разработать методику определения средних размеров капель, которая была успешно апробирована в одиночных каналах [1].

В настоящей работе разработанный подход был применен для исследования структуры капельного потока за плоской изолированной сопловой решеткой. В результате исследования были получены данные о характере распределения основных параметров жидкой фазы (коэффициенты скольжения, углы выхода, средние размеры капель). Это позволило провести анализ процессов межфазового взаимодействия в различных областях течения за сопловой решеткой. Полученная информация является необходимой при проектировании ступени, работающей в области влажного пара.

Литература

1. **Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Грибин В.Г.** Апробация расчетно-экспериментальной методики определения дисперсного состава жидкой фазы в полидисперсном двухфазном потоке // Тез. к. докл. XIV Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: 2013. Т.4. С. 200.

К.А. Трифонов, студ.; рук-ли Л.Е. Егорова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»), В.А. Верещетин (ОАО «ВТИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Во всех развитых странах теплоэнергетика по ее вкладу в загрязнение атмосферы занимает одно из первых мест [1]. При сжигании газообразного топлива основным загрязнителем являются оксиды азота. Современные методы очистки дымовых газов от оксидов азота обладают высокой эффективностью, однако имеют высокие капитальные и эксплуатационные затраты. Вместе с тем достичь нормативных значений NO_x зачастую удается с помощью технологических методов, значительно более дешевых, чем газоочистка. Одним из наиболее перспективных внутритопочных мероприятий, снижающих выбросы оксидов азота, являются малотоксичные горелочные устройства. Конструкция горелки определяет интенсивность воспламенения факела, скорость смешения топлива с воздухом и максимальный уровень температур в ядре горения. Следовательно, изменяя конструкцию горелки, можно уменьшить образование оксидов азота.

Достичь поставленной цели можно при помощи численного моделирования, которое решает проблему большой трудоемкости и высокой стоимости проведения промышленных испытаний или физического моделирования, необходимых для оценки конструктивных изменений и оптимизации инженерных решений.

В данной работе автором разработана трехмерная модель горелки и выполнен численный эксперимент по исследованию режимных и конструктивных факторов, влияющих на образование оксидов азота в факеле. Исследование и оптимизация ввода топлива и окислителя в горелку проводились расчетным способом с помощью программы ANSYS CFX.

В результате проведенных расчетных исследований были получены следующие результаты:

- при незначительных изменениях существующей конструкции горелки удалось в определенной степени оптимизировать условия подачи топлива и окислителя, а также их дальнейшего смешения;
- большая часть топлива сжигается в среде с недостатком кислорода, что позволяет снизить максимальные температуры и образование NO_x без увеличения химического недожога.

Литература

1. **Жабо В.В**. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1992.

Е.А. Тюшкина, студ.; рук. С.С. Дмитриев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ДИФФУЗОРНОМ ТЕЧЕНИИ

На основе экспериментально полученных распределений скорости в пограничном слое по длине плоской стенки при диффузорном течении (рис. 1) проведен анализ изменения силовых факторов, действующих на элементарный жидкий объем dV, движущийся в пограничном слое.

На рисунке 1 $Y = y/\delta$, $U = u/U_\infty$, $X = x/L$, где y — расстояние от стенки, δ — толщина пограничного слоя; x — расстояние вдоль стенки; L — длина стенки, u — скорость в пограничном слое на расстоянии y от стенки; U_∞ — скорость на внешней границе слоя.

В начальном сечении диффузорного участка на стенке фиксировался резкий рост положительного градиента давления, который при $X < 0{,}1$ очень быстро убывал, а при $X > 0{,}1$ значение dP/dx убывало очень слабо, оставаясь до выходного сечения практически постоянным.

На рисунке 2 показано изменение отрицательной величины $\partial u/\partial x$ по высоте слоя. Видно, что на начальном участке, где фиксировался максимальный положительный градиент давления, наибольшему торможению подвергаются не пристеночные слои, а слои на высоте $Y \approx 0{,}25$.

В непосредственной близости от стенки торможение пристеночных слоев практически неизменно по всей длине стенки, что свидетельствует о консервативности пристеночных слоев по отношению к воздействию положительного градиента давления.

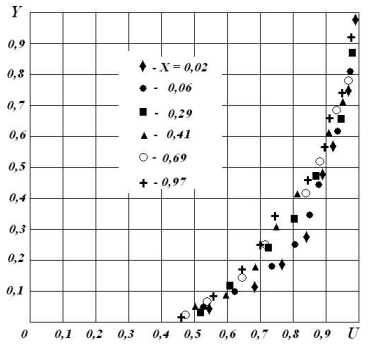


Рис. 1. Распределение скоростей в пограничном слое по длине плоской стенки

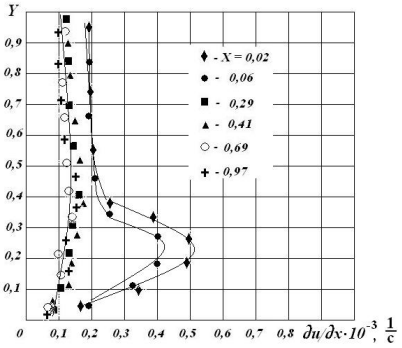


Рис. 2. Распределение величины $\partial u/\partial x$ по высоте слоя для разных сечений по длине стенки

А.С. Фадин, студ.; рук. В.В. Чижов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ЗА ВХОДНЫМ УСТРОЙСТВОМ ЦИЛИНДРОВ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ СТУПЕНИ

Существующие конструкции входных устройств цилиндров мощных паровых турбин весьма несовершенны с точки зрения газодинамики, поскольку их приходится проектировать при весьма жестких ограничениях по габаритам, особенно в осевом направлении. Основные недостатки этих конструкций: резкие повороты потока с радиального на осевое, зажатость проходных сечений, неравномерный подвод пара в окружном направлении. Все это приводит к существенному отклонению параметров потока в окружном и радиальном направлениях от расчетных значений как в самом патрубке, так и перед прилегающей к нему ступени, что довольно сильно сказывается на ее экономичности и надежности.

В данной работе предлагается метод оценки потерь, вызванных неравномерностью распределения параметров потока и их отклонением от расчетных значений за выходным устройством на экономичность прилегающей ступени. К этим потерям относятся потери, связанные с нерасчетным углом обтекания входной кромки лопаток сопловой и рабочей решеток, потери на смешение потоков пара за решетками и потери из-за неравномерного распределения располагаемого теплоперепада.

Снижение лопаточного КПД ступени с учетом этих потерь будет равно [1]:

$$\Delta\eta_{\text{ол}} = \eta_{\text{ол}} - \eta_{\text{олн}} = \frac{1}{H_0}\left[\frac{c_{1t}^2}{2}\left(\zeta_{\text{сн}} - \zeta_{\text{с}}\right) + \frac{w_{2t}^2}{2}\left(\zeta_{\text{рн}} - \zeta_{\text{р}}\right)\right],$$

где $\eta_{\text{ол}}$ и $\eta_{\text{олн}}$ — лопаточный КПД ступени без учета и с учетом наличия неравномерности параметров потока перед ступенью; c_{1t}, w_{2t} — теоретические скорости выхода потока из сопловой и рабочей решеток; $\zeta_{\text{с}}$, $\zeta_{\text{сн}}$, $\zeta_{\text{р}}$, $\zeta_{\text{рн}}$ — коэффициенты потерь в сопловой и рабочей решетках без учета и с учетом наличия неравномерности.

При таком подходе необходимо иметь распределения скоростей, углов и давлений потока в окружном и радиальном направлениях за входным устройством, полученных в результате испытаний или пространственного расчета течения во входном устройстве, а также геометрии ступени.

Литература

1. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1993.

П.С. Хазов, студ., Е.Ю. Григорьев, ст. преп. (ИГЭУ, г. Иваново)
рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИННОВАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ДИФФУЗОРАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Осесимметричные кольцевые диффузоры являются неотъемлемым элементом всех крупных энергетических газовых турбин, так как позволяют увеличить фактический перепад энтальпий на проточную часть турбины и, тем самым увеличить ее внутренний относительный КПД [1].

Однако, условия течения газа в указанных диффузорах оказываются крайне сложными, так как поток рабочего тела за последней ступенью характеризуется высокой степенью нестационарности при очень высоких амплитудах пульсаций давления. Соответственно переменные усилия, действующие на стенки диффузоров, оказываются очень высокими, а основные несущие частоты оказываются достаточно низкими.

По указанным причинам уровень вибрации стенок диффузоров в ряде случаев достигает недопустимо высоких значений, способных вызвать их разрушение.

В представленных материалах рассматриваются способы снижения динамических нагрузок на стенки кольцевых диффузоров как за счет гашения пульсаций давления, так и за счет демпфирования динамических нагрузок в пристеночных областях при особенностях течения рабочей среды за последней ступенью турбомашины.

Для практической реализации указанных задач на внешнем обводе кольцевого диффузора были установлены продольные клиновидные ребра, причем вершина клиновидных ребер располагалась во входном сечении диффузора, а свободные ребра клиньев располагались параллельно продольной оси диффузора.

Второй путь снижения вибрации стенок диффузора предусматривает установку внутри трубы около стенок перфорированной обечайки, отделяющей основной поток от прямого контакта с защищаемой стенкой. Для исключения паразитных протечек рабочего тела в зазоре применяется ватная набивка.

Проведенные исследования показали весьма высокую эффективность обоих методов защиты обтекаемых поверхностей от действия высоконестационарного потока.

Литература

1. **Дейч М.Е., Зарянкин А.Е.** Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. М.: Энергия, 1970.

И.С. Харечко, студ.; рук. Ю.Ю. Зуев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Традиционным решением задачи создания экономичного объемного гидропривода с бесступенчатым регулированием скорости движения выходного звена является использование в составе привода насоса с электрогидравлическим механизмов управления подачей (ЭгМУ). Такие приводы с насосным управлением (ОГП-НУ) требуют организации специальной системы формирования управляющих сигналов для ЭгМУ, отличаются повышенной стоимостью, габаритами и массой. Применение асинхронного электродвигателя (АЭД) с регулированием частоты вращения ротора с помощью частотного преобразователя (ЧП) позволяет создавать объемные гидроприводы с частотным управлением (ОГП-ЧУ), имеющие недорогие и компактные нерегулируемые объемные гидромашины. Такие ОГП-ЧУ могут найти широкое применение во многих отраслях промышленности, где требуются компактные, недорогие, надежные унифицированные гидроприводные системы с умеренным диапазоном бесступенчатого регулирования скоростью в пределах от 0,3 до 1,3 по отношению к номинальному значению. В работе выполнен анализ основных показателей, характеризующих функциональную пригодность и конкурентоспособность ОГП-ЧУ, выполнено теоретическое исследование статических и динамических характеристик ОГП-ЧУ с асинхронным электродвигателем и частотным преобразователем.

В результате анализа астатических (регулировочных и энергетических) характеристик установлено, что при сравнении ОГП-ЧУ и ОГП-НУ имеет место незначительное расширение диапазона регулирования и более пологая характеристика КПД привода с частотным управлением.

Показано, что ОГП-ЧУ, укомплектованный АЭД с малоинерционным ротором, может иметь значительные преимущества по сравнению с ОГП-НУ в динамических режимах даже без встроенного блока энергонакопления. Достаточно простая реализация рекуперативных режимов при движении выходного звена ОГП-ЧУ с помогающими нагрузками также способствует повышению конкурентоспособности таких приводов.

Е.Г. Хлыст, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ

Методические рекомендации расчета физических процессов в паровых котлах, в частности [1] разработанные во второй половине XX века, ориентировались на ручной счет. Они имеют значительное количество допущений и упрощений.

Современные программные средства, используемые для теплогидравлического расчета, например программа Boiler Designer [2], позволяют получить более точные результаты, чем при использовании всех допущений [1]. Расчет естественной циркуляции в паровом котле при использовании программы Boiler Designer учитывает изменение давления в контуре циркуляции и, как следствие, изменение свойств среды на каждом расчетном участке в отличие от [1], где все свойства среды разрешается принимать при давлении в барабане.

Технологический прогресс в энергетике вынуждает выходить за рамки общепринятых стандартов [3] и рекомендаций [1]. В соответствии с [3] паровые котлы не проектировались на давление пара менее 0,9 МПа, поэтому авторами [1] не предусмотрено определение параметров двухфазной среды, в частности напорного паросодержания φ для давления в барабане менее 1 МПа. Сейчас существует большое количество котлов-утилизаторов для ПГУ с тремя контурами давления. Величина давления в 3-м контуре составляет от 0,4—0,7 МПа. В [1] четких рекомендаций для определения характеристик среды для подобных случаев нет.

Целью работы является исследование результатов, полученных при помощи различных расчетных методик [4] определения параметров двухфазной среды и сравнение их с результатами, рассчитанными по [1].

Литература

1. **Гидравлический** расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / О.М. Балдина, В.А. Локшин, Д.Ф. Петерсон и др. // под ред. Локшина В.А. и др. — М.: Энергия, 1978.

2. **Расчет** котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов: учеб. пособие / Г.И. Доверман, Б.Л. Шелыгин, А.В. Мошкарин, Ю.В. Мельников. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2007.

3. **ГОСТ 3619—89.** Котлы паровые стационарные. Типы и основные параметры. М.: ИПК Издательство стандартов, 1995.

4. **VDI Heat atlas** ed. Association of German Engineers. Dusseldorf: VDI- Verl., 1993.

С.В. Хомяков, асп.; рук. В.Г. Грибин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВДУВА ПАРА В МЕЖЛОПАТОЧНОМ СОПЛОВОМ КАНАЛЕ

Несмотря на наличие многочисленных расчетно-экспериментальных данных проблема течения влажнопаровых потоков в проточных частях паровых турбин остается весьма актуальной. Особенно остро вопрос надежности и эффективности работы стоит для последних ступеней ЦНД. В первую очередь это связано с наличием в потоке перед вращающимися решетками крупнодисперсной эрозионно-опасной влаги, которая способствует разрушению рабочих поверхностей лопаток. Основным источником крупных капель в проточных частях турбомашин является срыв с выходных кромок и последующее дробление водяной пленки, формируемой на поверхностях межлопаточных каналов.

На данный момент для повышения надежности последних ступеней паровых турбин активно используются методы сепарации пленки из проточной части [1]. Альтернативой сепарации жидкой пленки может являться наддув греющего пара в области стенок сопловых лопаток. Данный метод предполагает не удаление влаги и части рабочего тела, а воздействие на пленку путем ее активного разрушения паровым потоком. Ряд немногочисленных исследований эффективности этого метода [2] показал, что внутриканальный наддув греющего пара является перспективным направлением в вопросе повышения надежности работы последних ступеней паровых турбин.

В настоящей работе проведено расчетно-экспериментальное исследование влияния вдува греющего пара на основные характеристики крупнодисперсных эрозионно-опасных капель за изолированной сопловой решеткой. Выявлены особенности влияния вдува на характеристики паровой фазы. Изучен характер изменения параметров капель за решеткой (скорости, углы выхода, размеры) при различных значениях давления вдуваемого пара. Определены оптимальные значения перепада давления на щели, при котором минимально искажается основной поток и эффективно разрушается водяная пленка на поверхностях межлопаточного канала.

Литература

1. **Грибин В. Г., Коршунов Б. А., Тищенко А. А.** Исследование внутриканальной сепарации влаги в турбинных сопловых решетках // Теплоэнергетика. 2010. № 9.

2**. Liang Xu, Peigang Yan, Hongyan Huang, Wanjin Han.** Effects of hot steam injection from the slot at the trailing edge on turbine nozzle vane flow field // Journal of Thermal Science. 2008. Том 17. No 4.

Г.В. Штанг, студ.; рук. Д.В. Шилин, вед. инж. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «КАСКАД»

Целью работы являлась разработка учебного лабораторного стенда «Каскад». В рамках задач, поставленных в работе, был собран стенд, написана программа для ПЛК фирмы Siemens, осуществляющая управление технологическим процессом дозирования и нагрева жидкости, а также создан HMI (человеко-машинный интерфейс) на основе Simatic WinCC flexible, позволяющий контролировать ход технологического процесса.

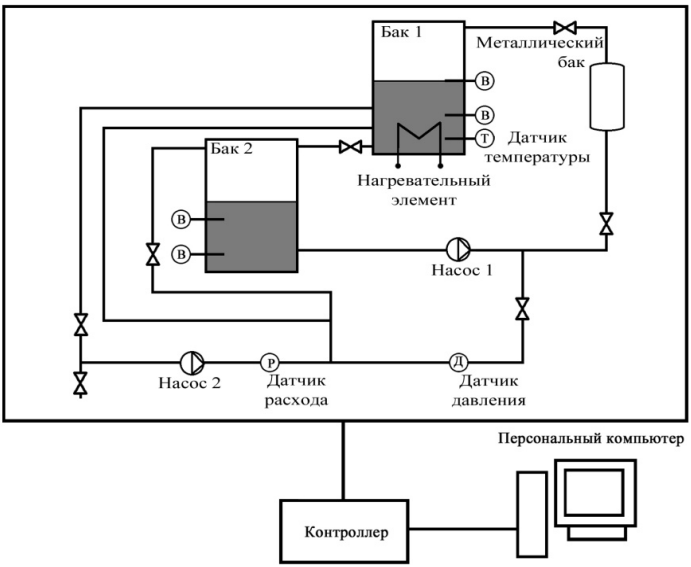


Рис. 1. Структурная схема учебно-лабораторного стенда «Каскад»

На рис. 1 приведена структурная схема учебно-лабораторного стенда для освоения методов управления технологическими процессами в промышленности. В состав системы входят два бака с водой, металлический бак для охлаждения жидкости, насосы, емкостные датчики наличия воды, нагревательный элемент, отсечные клапаны и датчики расхода, давления и температуры. В качестве управляющего устройства используется программируемый логический контроллер SIEMENS SIMATIC S7-300 (ПЛК).

Секция 49

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ, НАДЕЖНОСТИ И КОНСТРУИРОВАНИЯ

Председатель секции — д.т.н., профессор В.М. Матюнин
Секретарь секции — к.т.н., доцент П.В. Волков

Р.Ю. Агафонов, асп.; рук-ли В.М. Матюнин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»), В.В. Данилин, нач. отд. (ОАО «Российские космические системы»)

ОЦЕНКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА 01439А

Перспективным направлением в улучшении комплекса свойств металлических материалов авиакосмического назначения (включая защитные свойства) является разработка высокопрочных сплавов новых систем легирования с использованием добавок переходных и редкоземельных металлов. Опытный сплав алюминия с добавками диспрозия и лантана (сплав 01439А) был рекомендован для изготовления корпусов приборов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и защитных экранов электронной компонентной базы. Для таких изделий одним из важнейших критериев является получение равнопрочных вакуумноплотных соединений элементов, подвергающихся сварке.

Была проведена оценка формирования сварных соединений элементов изделий из сплава 01439А при использовании электронно-лучевой сварки. Внешний осмотр сварных образцов не выявил дефектов. С использованием безобразцового контроля получено распределение значений временного сопротивления в области шва, околошовной зоны и основного металла. Наименьшие значения временного сопротивления оказались вдоль линии сплавления. При испытаниях на растяжение разрушение образцов происходило по линии сплавления. Разрушение по линии сплавления и повышенная прочность сварного шва объясняется ликвацией примесей редкоземельных металлов в алюминиевом основании, которая была установлена при исследовании микроструктуры различных зон сварных соединений. В районе линии сплавления наблюдается уменьшение количества редкоземельных элементов, а в зоне шва — увеличение. В области основного металла наблюдается гомогенная структура. Из-за повышения концентрации редкоземельных металлов в зоне шва появляется возможность образования

интерметаллических структур, которые могут вызвать охрупчивание сварного соединения.

Механические свойства, определенные на опытных образцах, полностью соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к сварным соединениям элементов изделий РЭА и защитных экранов.

Д.В. Гриневич, асп.; рук-ли В.П. Чирков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»),
Е.А. Канунникова, к.т.н. (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОЙ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современные космические аппараты (КА), как сложные механические системы, могут содержать большое количество упругих элементов (солнечные батареи, антенны) [1], протяженные раскрывающиеся конструкции, что приводит к необходимости связного решения задач управления движением и динамики упругой системы. Этим объясняется возрастающий в последнее время интерес к созданию универсальных моделей, способных комплексно учитывать разнородные факторы, имитирующие реальный объект. При решении задачи моделирования динамики КА можно выделить три основных класса задач [2]:

1) движение КА как твердого тела под действием системы ориентации;

2) упругие колебания элементов конструкции КА;

3) изменение конфигурации КА — раскрытие трансформируемых конструкций, поворот солнечных батарей.

Основной целью работы являлось создание и верификация универсальной динамической модели КА с учетом изменяемой геометрии, упругих свойств и системы ориентации. Для этого была сформулирована и реализована в программных комплексах кинематического, конечно-элеметного и математического анализа задача совместного решения уравнений движения свободного упругого тела и уравнений системы ориентации КА.

На основе предложенного подхода могут быть созданы динамические модели КА различных конструкций и принципов работы систем ориентации, что позволит на этапе разработки новых систем получить более достоверную информацию о динамике управляемого КА.

Литература

1. **Малаховский Е.Е.** Точность стабилизации гибких космических аппаратов и нормирование механических воздействий от внутренних источников возмущения // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 5.

2. **Васильев В.Н.** Системы ориентации космических аппаратов. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. — 310 с.

А.А. Демин, А.С. Демина, О. Матковская, студенты;
рук. В.Е. Хроматов, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТОКОНЕСУЩИХ ПЛАСТИН В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В работе на основе гипотез магнитоупругости электропроводящих пластин и оболочек [1] и разработанного программного комплекса для исследования спектров колебаний пластин [2,3] исследуется влияние поперечного магнитного поля и плотности тока, проходящего через пластину-полосу, на собственные частоты колебаний пластины. Рассматривается бесконечная токонесущая пластинка, помещенная в постоянное внешнее магнитное поле с вектором индукции, нормальным к срединной плоскости пластины. Начальное магнитное поле слагается из собственного магнитного поля пластины и внешнего поперечного магнитного поля. На основе гипотез магнитоупругости тонких тел выведены соотношения для определения собственных частот колебаний токонесущей пластинки, изготовленной из алюминия, в поперечном магнитном поле. Собственные частоты рассчитывались на основе разработанного программного комплекса «Магнитоупругость» в среде Borland Delphi 7 [3]. Установлено, что собственное магнитное поле приводит к затуханию колебаний. При достаточно сильном внешнем поперечном магнитном поле влиянием собственного магнитного поля можно пренебречь. Если колебания зависят только от одной поперечной координаты, то собственное магнитное поле вообще не влияет на колебания пластинки. При увеличении индукции внешнего магнитного поля собственные частоты уменьшаются при постоянном значении плотности тока. Чем выше плотность тока, тем больше собственная частота. Увеличение индукции магнитного поля оказывает более существенное влияние на высшие частоты колебаний. При увеличении плотности тока собственные частоты сначала возрастают, а потом падают.

Литература

1. **Амбарцумян С.А., Багдасарян Г.Е.** Электропроводящие пластинки и оболочки в магнитном поле. М.: Физматлит. 1996. — 286 с.

2. **Хроматов В.Е., Голубева Т.Н.** Влияние магнитных полей на колебания и устойчивость пластин из ферромагнитного материала // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 12—16.

3. **Demin A., Golubeva T., Demina A.** The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in a magnetic field // XIth Students' Science Conference, 03-06 October 2013. Paper of the Students of the Wroclaw University of Technology, 2013. No18. P. 61—66.

Л.И. Еремин, студ.; рук. А.Н. Воронцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРИ АРМАТУРЫ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Повреждение элементов железобетонных конструкций вследствие коррозии является одной из основных проблем, снижающих несущую способность конструкции и ее срок службы. Дефекты стальной арматуры могут быть обнаружены с помощью методов неразрушающего контроля, на основании чего возможно сделать выводы об изменении технического состояния балки и спрогнозировать оставшийся срок службы.

В работе представлены результаты исследования влияния отказа арматуры как на несущую способность балки, так и на ее эксплуатационные параметры, такие как образование трещин, раскрытие и закрытие трещин и прогибы [1]. Исследование проводилось по методу предельных состояний в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП 2.03.01—84) на примере балки конкретного сечения, используемой в качестве пролета железобетонного моста.

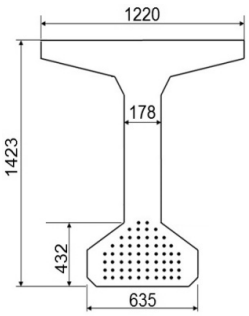


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой балки

В ходе исследования проведена оценка порога чувствительности магнитной дефектоскопии по отношению к изменениям параметров технического состояния балки, определены наиболее чувствительные к обрыву арматуры параметры, даны рекомендации по интерпретации данных неразрушающего контроля.

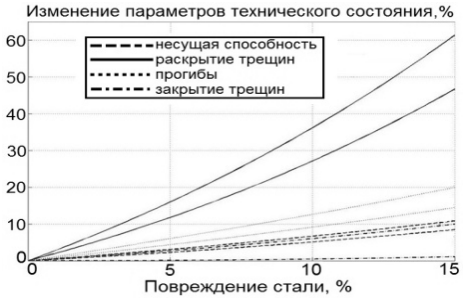


Рис. 2. Изменение параметров технического состояния балки

Литература

1. **Попов М., Чарыев Н.** Железобетонные и каменные конструкции. М.: Высшая школа, 1996.

Ж.В. Зайкина, студ.; рук. В.П. Радин, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ЗАДАЧА РЕУТА С ПЕРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРОМ

Задача об устойчивости консольного стержня, защемленного на одном конце, при действии сжимающей силы постоянного направления и положения вошла в литературу под названием задачи Реута [1] и является одним из классических примеров неконсервативных задач теории упругой устойчивости. В данной работе рассматривается другой, широко распространенный при составлении расчетных схем реальных конструкций, способ закрепления стержня, а именно: шарнирное опирание в двух сечениях с переменным расстоянием между опорами γl ($0 < \gamma \le 1$, l — длина стержня). Цель задачи состояла в исследовании зависимости критического значения нагрузки от межопорного расстояния. Анализ устойчивости проводится динамическим методом с применением метода разложения решения уравнения возмущенного движения в ряд по формам собственных колебаний. После применения процедуры метода Бубнова—Галеркина получается система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат. Критические значения α_* параметра нагрузки α соответствуют переходу хотя бы одного из характеристических показателей в правую полуплоскость. Зависимость $\alpha_*(\gamma)$ состоит из двух характерных участков, соответствующих различным типам потери устойчивости: дивергенции и флаттеру. Как и в книге [2], показана эквивалентность решенной задачи известной задаче Бека.

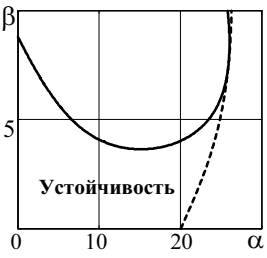


Рис. 1. Границы области устойчивости

В работе также рассматривается задача об устойчивости прямолинейной формы равновесия стержня при совместном действии вышеупомянутой силы и следящей силы β, точка приложения которой также постоянно находится на оси *Ox*, связанной с недеформированной осью стержня. На рис. 1 построены границы области устойчивости на плоскости параметров нагружения α,β. Сплошная линия соответствует дивергенции. Штриховая линия — граница флаттера. По этим данным можно судить о стабилизирующем и дестабилизирующем влиянии нагрузок разного характера на устойчивость стержня.

Литература

1. **Болотин В.В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961. — 339 с.

2. **Феодосьев В.И.** Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1973. — 400 с.

М.Н. Кабирова, студ.; рук. В.П. Чирков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ РЕКЛАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВЕТРОВУЮ НАГРУЗКУ

В данной работе представлены основные результаты вероятностного расчета рекламных щитов с различным способом закрепления на опорных стойках на ветровую нагрузку.

Вследствие случайного характера ветровой нагрузки оценка расчетной скорости ветра и анализ влияния его порывов на сооружение были основаны на методах математической статистики, теории вероятностей и теории случайных функций [1—3]. Скорость ветра рассматривалась как случайный векторный процесс, который описывается своими пространственными и временными статистическими характеристиками: спектральной плотностью, дисперсией и корреляционными функциями. При таком подходе воздействия ветра на сооружения также рассматривались как случайные функции времени и пространственной координаты. Для интерпретации вероятностных процессов были применены методы теории надежности [1, 3].

Для типовых рекламных конструкций были разработаны алгоритмы моделирования ветровых воздействий в статической постановке и с учетом случайной пульсационной составляющей скорости ветра. Проведены исследования воздействия случайных ветровых нагрузок на различные типы рекламных щитов с оценкой показателей надежности и вычислением расчетных значений скорости ветра. Проведен расчет напряжений в несущих опорах.

В результате выполнения работы выявлены приемлемые параметры рекламных конструкций и получены оценки вероятности их безотказной работы.

Литература

1. **Болотин В.В., Чирков В.П.** Надежность механических систем. Надежность технических систем. Справочник / под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. С. 438—457.

2. **Вибрации** в технике. Справочник в 6 томах. Т. 1. Колебания линейных систем. — 2-е издание, испр. и доп. / под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1999. 504 с.

3**. Болотин В.В.** Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. — 351 с.

Е.П. Кузьмин, асп. (НИУ «МЭИ»), А.Н. Серветник, вед. инж. (ЦИАМ, Москва); рук. А.Н. Воронцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДИСКА С ЭКСПЕРИМЕНТОМ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Диски авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) являются высоконагруженными деталями сложной формы с интенсивными концентраторами напряжений, в которых при вращении возникает трехосное напряженное состояние [1]. Использование в расчетах численных методов позволяет учесть как особенности конструкции и нагружения, так и разброс значений характеристик конструкционной прочности материала.

В работе представлены результаты квазистатического численного моделирования разгонных испытаний диска типовой конструкции турбины АГТД, проведено их сравнение с результатами эксперимента (рис. 1). Для определения напряженно-деформированного состояния диска в процессе поэтапного нагружения использован метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование полей упругопластических деформаций проводилось с использованием теории пластического течения с изотропным упрочнением [2]. Исследовано влияние на модель условий текучести Мизеса и Треска, а также вида функции экспериментальной диаграммы деформирования и разброса механических свойств материала.

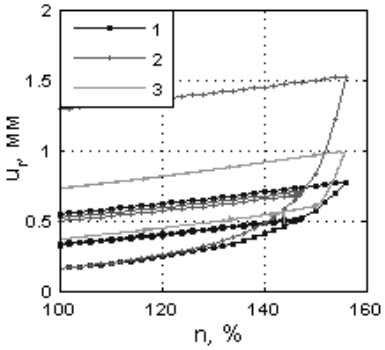


Рис. 1. Радиальное перемещение - относительная частота вращения: *1* — расчет по критерию Мизеса; *2* — расчет по критерию Треска; *3* — результаты эксперимента

Показана высокая чувствительность параметров модели материала (условие текучести, схематизация кривой деформирования) к результатам определения удлинений диска при его раскрутке в области больших упругопластических деформаций.

Литература

1. **Nozhnitsky Yu, Karimbaev K., Servetnik A.** Numerical simulation of spin testing for turbo machine disks using energy-based fracture criteria. Proceedings of ASME TURBO EXPO Conference, Copenhagen, 2012 [электронный ресурс].

2. **Термопрочность** деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр и др.М.: Машиностроение, 1975.

И.А. Куприянов, студ. (НИУ «МЭИ»);
рук-ли Б.Р. Рябиченко, к.т.н., доц. (НИКИМТ, Москва),
М.А. Каримбеков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА С УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДУГОЙ

В работе изучены поведение и технологические особенности дуги горящей с неплавящегося вольфрамового электрода (подвижно одно анодное пятно) при ее колебании вдоль или поперек шва с помощью наложенного поперечного магнитного ноля. Разработаны также оборудование и технология для сварки с колебаниями дуги, управляемыми при помощи магнитного поля.

Для выяснения возможностей магнитного управления определена величина отклонения анодного пятна дуги в зависимости от тока дуги, длины дугового промежутка и напряженности наложенного магнитного поля.

Экспериментальным путем (замером напряжения горения) получены вольтамперные характеристики дуги при наложении на нее поперечного магнитного поля, которые показали, что устойчивый процесс обеспечивается с применением стандартных источников питания.

Калориметрированием процесса сварки установлено, что эффективный КПД дуги при сварке с магнитным управлением на 4—7 % ниже, чем при сварке без магнитного управления. Снижение эффективного КПД дуги объясняется увеличением длины столба при наложении поперечного магнитного поля и, следовательно, увеличением его конвективного теплообмена с окружающей средой.

На основе данных по отклонению дуги в магнитном поле определены требования к электромагнитным системам для управления дугой.

В результате исследования электромагнитных систем различного типа была разработана электромагнитная система, обеспечивающая отклонение или колебание дуги относительно шва в области всех применяемых режимов сварки.

На основе этих требований были разработаны и изготовлены горелка с электромагнитной системой и источники тока подмагничивания, обеспечивающие продольные или поперечные колебания дуги.

Технологические особенности процесса — необходимая частота колебания дуги и особенности образования и кристаллизации сварного шва исследованы при сварке встык и наплавке.

А.Ю. Марченков, асп.; рук. В.М. Матюнин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Как известно, для металлических материалов и изделий характерно наличие различного рода концентраторов напряжений (КН) — участков малых размеров, обладающих повышенными остаточными напряжениями. В зависимости от происхождения различают конструктивные, металлургические, технологические и эксплуатационные КН. Наиболее проблемными являются структурные зоны концентрации напряжений (СЗКН) — локальные объемы металла, в которых напряжения могут превышать номинальные для данной конструкции, а иногда и достигать значений разрушающих напряжений. Типичными СЗКН являются скопления дислокаций, полос скольжения, неметаллических включений и др.

В данной работе представлены результаты исследования СЗКН, обнаруженных в металле элементов энергетического оборудования. Анализ структурно-механического состояния металла в СЗКН проводился с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии, а также метода микроиндентирования.

По результатам исследований было установлено, что причиной образования СЗКН является скопление первичных и вторичных полос скольжения, образовавшихся в процессе изготовления изделий. С помощью электронного микроскопа измерены геометрические параметры полос скольжения (длина, расстояние между ними, углы разориентировки).

С использованием полученных результатов была проведена расчетная оценка приращения напряжения в СЗКН по модели Тейлора [1] и критического напряжения, необходимого для образования трещины, по модели Зинера-Стро [2]. Сопоставление расчетных значений напряжений с экспериментальными, определенными методами микроиндентирования [3], показало их близкое совпадение.

Литература

1. **Роль** дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В.С. Иванова и др. М.: Наука, ИМЕТ им. А.А. Байкова, 1965.

2. **Бернштейн М.Л.** Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1974.

3. **Матюнин В.М., Демидов А.Н., Марченков А.Ю.** Определение механических свойств металла в зонах концентрации напряжений (ЗКН) изделий машиностроения // Технология металлов. 2009. № 7. С. 19—22.

В.А. Парфенов, асп.; рук. М.В. Чепурин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ОПРАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРА «ДОЛЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ»

В предлагаемой работе предложена методика расчетов, позволяющая рассмотреть и учесть влияние формы оправки при воздействии на внутреннее строение заготовки-гильзы в процессе винтовой прошивки, которое оценивали по изменению параметров циклического формоизменения [1] и доли поперечной деформации [2, 3]. При этом определяли в каждом единичном обжатии коэффициенты деформации по трем осям, долю поперечной деформации.

Для более подробного анализа влияния положения оправки по параметрам циклического формоизменения (ПЦФ) были использованы оправки с разным профилем рабочей части.

Для оценки величины поперечной деформации используем показатель имеющий вид [4]

$$A_\theta = \frac{\ln\theta}{\ln\mu},$$

где $\ln\mu$ и $\ln\theta$ — истинные коэффициенты вытяжки и поперечной (окружной) деформации.

По проведенным расчетам и построенным в работе зависимостям можно утверждать, что форма оправки оказывает существенное влияние на величину поперечной деформации и, следовательно, на проработку исходной литой структуры заготовки.

Литература

1. **Golubchik R.M., Lebedev A.V.** New methods piercing mills setting relaring to the cyclic forming of hollows. History and future of seemless steel tubes (7-th International Conference)/ Karlovy Vary, 1990, November, p. 1/8 — 1/17.

2. **Галкин С.П.** Показатель поперечной деформации при прошивке заготовок // Производство проката. 2011. № 9. С. 18—23.

3. **Golubchik R.M., Merkulov D.V., Toporov V.A., Parfenov V.A.** Ways of structure reaming enhancement when piercing uninterruptedly casted sections. XIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. Czestochowa, 2012, p. 341—347.

4. **Меркулов Д.В., Голубчик Р.М., Топоров В.А., Чепурин М.В., Парфенов В.А., Медведева С.Е.** Влияние диаметра заготовки на проработку литой структуры и количество дефектов // Труды IX международного конгресса прокатчиков, ООО «Объединение прокатчиков», (Череповец, 16—18 апреля 2013). С. 184—193.

И.В. Петрова, студ.; рук. В.В. Новокрещенов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СТРУКТУРНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время широко исследовано влияние механических напряжений, деформаций, температуры, формы и размеров тела на механические свойства металлов, такие как пределы прочности σ_B и текучести σ_T, а также относительное удлинение δ. В частности, в работах [1—3] рассмотрено пластическое течение материала в зоне круглых надрезов радиусом R при растяжении плоского образца.

В то же время зависимость между механическими свойствами металлов (σ_B, σ_T и δ) и их структурно-кристаллическим строением изучена слабо.
В работе проводится исследование этой зависимости, а также проверка используемой методики расчета на практике.

Для этого был проведен расчет условного относительного критерия А, величины приращения ширины образца Δ и его длины Δl:

$$A = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\sigma_T}. \qquad (1)$$

Расчет проводился для различных металлических материалов со следующим строением:

1) с ОЦК решеткой и ферритно-перлитной структурой;

2) с ОЦК решеткой и ферритной структурой;

3) с ГЦК решеткой и аустенитной структурой.

Полученные теоретические значения приращения длины образца Δl для ряда рассчитанных металлов были проверены на универсальной испытательной машине Inspektdesk 50 кН.

По результатам работы получены зависимости величины приращения длины образца Δl от геометрии образца, а также зависимости оптимального радиуса надреза R от величины критерия А и относительного удлинения δ от величины приращения длины образца Δl и сделаны соответствующие теме выводы.

Литература

1. **Работнов Ю.Н.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1998.

2. **Нотт Дж.Ф.** Основы механики разрушения: пер. с англ. М.: Металлургия, 1978.

3. **Деформационное** упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / под ред. В.И. Трефилова. Киев: Наукова думка, 1989.

А.В. Рыбин, асп.; рук. В.Н. Щугорев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОСАДКИ САМОЛЕТА

Задача определения нагрузок и обеспечения прочности самолета при посадке остается одной из важнейших проблем расчета авиаконструкций, за что говорит тот факт, что большинство чрезвычайных ситуаций на воздушных суднах по-прежнему происходит во время взлета и посадки.

Необходимость решения контактной задачи возникает при моделировании двух процессов: движения внутренних деталей амортизатора опоры шасси [1] и взаимодействия самолета и земли. В первом случае необходимо рассматривать контакт между движущимися частями и корпусом амортизатора, во втором — контакт между шасси и землей. Оба этих процесса играют ключевую роль в корректном расчете динамических процессов посадки.

В представленной работе оба вида контактных задач решены с помощью метода конечных элементов (рис. 1). Рассмотрено несколько вариантов их реализации и применения в моделировании динамики посадки самолета. Описаны особенности численного решения поставленных задач. Учтены результаты исследований в работе [2]. Полученные результаты сверены с экспериментальными данными копровых испытаний в СибНИА и летных испытаний самолета.

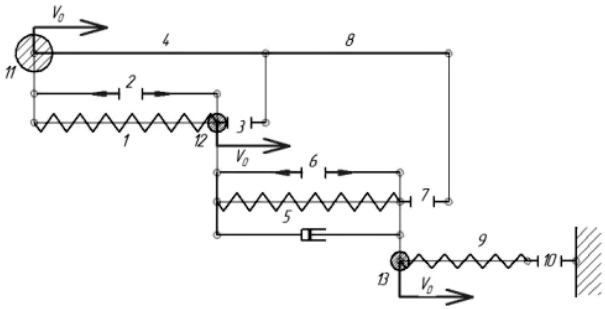


Рис. 1. Схема двухкамерного амортизатора:
2, *6* — контактные элементы, ограничивающие прямой ход; *3*, *7* — контактные элементы, ограничивающие обратный ход

Литература

1. **Зайцев В.Н., Рудаков В.Л.** Конструкция и прочность самолетов. Киев: Вища Школа, 1978.

2. **Снисаренко Т.В., Чубань В.Д.** Математическое моделирование динамических нагрузок при взлете и посадке упругого самолета // Ученые записки ЦАГИ. 2008. Т. XXXIX. № 3. С. 63—76.

С.О. Савкин, студ.; рук. А.В. Еремин, асс. (СамГТУ, г. Самара)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Приведено решение квазистатической задачи термоупругости для длинного полого цилиндра в случае его плоской деформации, обусловленной плоским осесимметричным температурным полем в следующей математической постановке [1]:

$$\frac{d^2}{dr^2}U(r)+\frac{1}{r}\frac{d}{dr}U(r)+\frac{U(r)}{r^2}-\alpha\left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)\frac{dT(r)}{dr}=0; \tag{1}$$

$$\left[\left(1-\nu\right)\frac{dU(r)}{dr}+\nu\frac{U(r)}{r}-\left(1+\nu\right)\alpha T(r)\right]_{r=r_1}=0\ , \tag{2}$$

$$\left[\left(1-\nu\right)\frac{dU(r)}{dr}+\nu\frac{U(r)}{r}-\left(1+\nu\right)\alpha T(r)\right]_{r=r_2}=0\ , \tag{3}$$

где $U(r)$ — радиальное перемещение.

Решение задачи (1) — (3) отыскивается в виде [2]

$$U\left(r\right)=\sum_{i=0}^{n}B_i\,r^i\ , \tag{4}$$

где $B_i\,(i=\overline{0,\ n})$ — неизвестные коэффициенты, для определения которых потребуем, чтобы соотношение (4) удовлетворяло граничным условиям (2), (3) и уравнению (1) в конкретных точках пространственной переменной. В результате получим систему алгебраических уравнений, из решения которой могут быть найдены $B_i\,(i=0,\ n)$. Для повышения точности решения необходимо увеличивать число точек области, в которых точно выполняется уравнение (1). На рис.1 приведены результаты расчетов радиальных напряжений при удовлетворении уравнения (1) в 3, 5, 10 и 15 точках пространственной координаты.

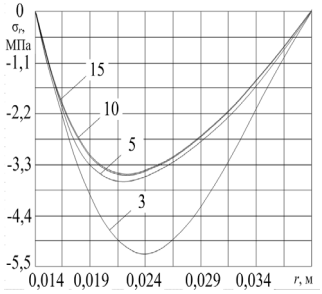


Рис. 1. Изменение радиальных напряжений. Выполнение уравнения (1) в 3, 5, 10, 15 точках области

Литература

1. **Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости. М.: Атомиздат, 1979.

2. **Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В.** Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высшая школа, 2005.

А.М. Сахаров, студ.; рук. А.Н. Воронцов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА И МЕТОДА ПРЯМОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ В ДИНАМИКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Большинство расчетов конструкций на сейсмостойкость проводится с использованием линейно-спектральной теории (ЛСТ) на основе известных спектров отклика. Данный метод с введением определенных допущений позволяет получить «наиболее вероятную» оценку отклика конструкции [1]. Недостатками такого расчета являются получение результатов в абсолютном значении, отсутствие информации о перемещении элементов системы во времени и невозможность учета нелинейных эффектов. Альтернативой использованию ЛСТ при обосновании сейсмостойкости является прямой динамический анализ. При наличии исходных данных, описывающих движение основания, например акселерограмм, данный метод позволяет получить историю деформирования конструкции с учетом таких нелинейностей, как контактное взаимодействие и упругопластическое поведение материалов. Ограничениями метода является высокая ресурсоемкость и отсутствие строгих правил синтеза акселерограмм на основании имеющихся спектров отклика.

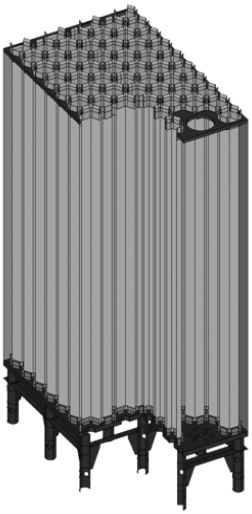


Рис. 1. Секция стеллажей бассейна выдержки

В работе представлено сравнение результатов, полученных по ЛСТ, с результатами прямого пошагового интегрирования. Исходными данными для расчета по ЛСТ служат спектры отклика по трем взаимно ортогональным направлениям; в качестве данных динамического анализа используются акселерограммы, синтезированные согласно рекомендациям [2]. Объектом исследования является секция стеллажей бассейна выдержки реакторного здания АЭС (рис. 1). Проведен анализ откликов системы на сейсмическое воздействие и исследовано изменение динамического поведения конструкции при введении нелинейных параметров.

Литература

1. **Бирбраер А.Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. — 255 с.

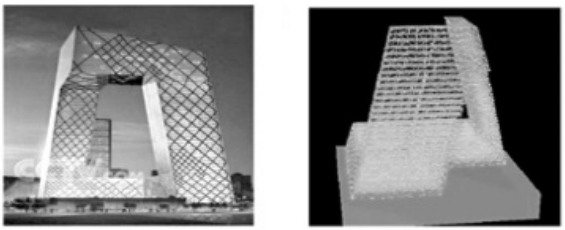
2. **Seismic** Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE4-98. Reston, Virginia, USA. 1999.

К.Ю. Семенова, студ.; рук. А.А. Шипков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ING+ ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В ВЫСОТНЫХ НЕТИПОВЫХ ЗДАНИЯХ ПРИ РАСЧЕТЕ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ И ВЕТРОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В ходе проектирования различных конструкций, в особенности нетиповых зданий, особое внимание уделяется расчетам на сейсмическое [1] и ветровое воздействия [2]. Автором были выполнены численные исследования по оптимизации конструктивных решений для строительных объектов, реализованные с помощью системы сквозного проектирования ING+ российских разработчиков [3].

Для проведения анализа было выбрано высотное здание (рис. 1, *а*) нетиповой конструкции Центрального китайского телевидения (высота 135 м, 27 этажей), адаптированное для проведения расчетных исследований (рис. 1, *б*). Предполагаемое место возведения объекта: IV ветровая зона, 9-балльное сейсмическое воздействие.



а) *б*)

Рис. 1. Прототип (*а*) и расчетная модель (*б*)

На основе проведенных исследований было установлено:

- установка новых элементов (колонн в дополнение к основным: плитам перекрытий и стержням стального профиля) позволяет увеличить жесткость конструкции и снизить влияние сейсмического и ветрового воздействий более, чем в 2 раза, что выражается в снижении ускорений плит перекрытый от пульсационной составляющей ветровой нагрузки и в снижении влияния факторов участия форм колебаний при сейсмическом воздействии);

- после установки дополнительных конструктивных элементов прогибы плит перекрытий уменьшились примерно в 1,5 раза;

- проведение нелинейного расчета с учетом трещинообразования в бетоне позволяет повысить точность определения прогибов плит перекрытий с повышением консервативности расчета по перемещениям в 1,2 раза.

Литература

1. **Бирбраер А. Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. — 255 с.

2. **Савицкий Г. А.** Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. — 110 с.

3. **http://www.tech-soft.ru**

Секция 50

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАНОТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — зав. каф. ТММ, д.т.н. И.В. Меркурьев
Секретарь секции — к.т.н., доцент Г.В. Панкратьева

Б.И. Адамов, асп.; рук-ли А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф., И.В. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

Существенно расширить рабочее пространство цилиндрических манипуляторов, таких как УМ-1, УПК-1, *Seiko RT*300, *Fanuc M*300 и проч., можно, установив их на подвижное основание.

В данной работе рассматриваются задачи управления таким манипулятором, функционирующим на трехколесной платформе (рис. 1). Предполагается, что робот движется по горизонтальной плоскости без отрыва и проскальзывания колес. В работе [1] рассматриваются вопросы траекторного управления такой системой. Для синтеза закона изменения управляющих воздействий был использован метод неопределенных множителей [2], согласно которому проекции вектора скорости схвата B на программной траектории рассматриваются как дополнительные кинематические связи, налагаемые на динамику робота, а управляющие усилия — как реакции этих связей.

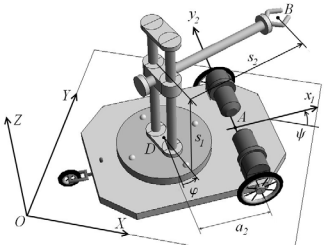


Рис. 1. Схема мобильного манипулятора

В данной работе метод неопределенных множителей обобщается для решения задачи погони робота за подвижным объектом, стабилизации программной траектории схвата в случае его неточного начального позиционирования.

Литература

1. **Адамов Б.И., Орлов И.В.** Управление мобильным манипулятором, работающим в цилиндрической системе координат // Вестник МЭИ. 2012. № 1.

2. **Мартыненко Ю.Г., Орлов И.В**. Алгоритмы управления мобильным манипулятором // Материалы научной школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», Москва, Россия 2—3 декабря 2002 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2002.

Е.А. Антонов, студ.; рук. В.В. Подалков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА L-L-ТИПА В РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Поставлена задача исследования поведения микромеханического гироскопа L-L-типа на вращающемся с постоянной угловой скоростью Ω основании, колебания резонатора которого по осям возбуждения являются поступательными. Рассматриваются случаи свободных и вынужденных колебаний [1]. Для случая собственных колебаний построено точное решение. Подробно рассмотрен случай вынужденных колебаний. В рамках исследования случая, когда вынуждающее воздействие является стационарным, рассмотрено влияние вязкого трения на амплитуду колебаний гироскопа [2]. Показано, что микромеханический гироскоп в режиме вынужденных колебаний является датчиком угловой скорости основания. Приведены амплитудно-частотные характеристики. Новизна данной работы заключается в том, что основная часть исследования посвящена рассмотрению нестационарного воздействия на систему. В данном случае частота вынуждающей силы задается функцией времени. Анализируется влияние сил вязкого трения на динамику микромеханического гироскопа представленного типа. Приведено численное решение, полученное методом двух масштабов. Показаны зависимости амплитуд от частотной расстройки. Также приведено точное решение.

Данное исследование актуально в настоящее время. Микромеханические устройства находят широкое применение в различных областях. На сегодняшний день ММГ используются в военной технике, космической и авиационной промышленности, медицине, робототехнике, автомобильной и бытовой промышленности и т.д. И темпы развития этой отрасли только возрастают [3,4].

Литература

1. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

2. http://fizmathim.com/nelineynye-effekty-v-dinamike-mikromehanicheskih-giroskopov

3. **Бороздин В.Н.** Гироскопические приборы и устройства систем управления. М.: Машиностроение, 1990.

4. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007.

Н.Д. Бабанов, студ.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
конс. И.П. Филин, вед. инж. (ПИО «МЭИ-Фесто»)

РАЗРАБОТКА ЛОКТЕВОГО СУСТАВА ЭКЗОСКЕЛЕТА ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

Локтевой сустав экзоскелета состоит из двух основных частей: устройства, регистрирующего движение плеча и предплечья оператора (УР), (рис. 1), и устройства, воспроизводящего эти движения (УВ), (рис. 2). УР состоит из двух несущих балок, соединенных шарнирно, на которых располагается потенциометр и крепления на руку. УВ полностью идентично УР геометрически, но изготовлено с использованием более прочных материалов с усилением шарнирного соединения и отличается наличием гидравлического цилиндра, с помощью которого система управляется.



Рис. 1. Регистрирующее устройство

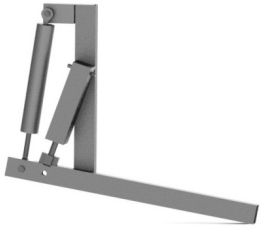


Рис. 2. Воспроизводящее устройство

Принцип работы сустава экзоскелета состоит в следующем. На вычислительное устройство поступают сигналы с потенциометров, находящихся на регистрирующем (УР) и воспроизводящем (УВ) устройствах. По разности показаний формируется сигнал, подаваемый на управляющую гидросистему. Таким образом, (УВ) дублирует движение (УР).

Проектирование [1] локтевого сустава требует решения целого ряда задач: составить кинематическую схему сустава, рассчитать конструкцию балок и шарниров (УВ) и гидравлическую схему с учетом предполагаемых силовых способностей экзоскелета. Необходимо также разработать систему управления.

Результаты работы показали, что для нагрузок массой не более 100 кг достаточно использовать радиальный однорядный подшипник. Конструкция стабильно удерживает и перемещает груз. Исходя из прочностных расчетов, достаточно использовать профильные трубы 20×40 мм. Есть возможность использовать аналоговую схему управления сигналами.

Литература

1. **Stephen J. Ball**., **Ian E. Brown, Stephen H. Scott** Performance Evaluation of a Planar 3DOF Robotic Exoskeleton for Motor Assessment, 2009.

И.А. Горкин, студ.; рук. И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПОВ

В настоящее время значительно возрос интерес к разработке и применению в системах управления, навигации подвижных объектов новых типов датчиков инерциальной информации, созданных по технологиям микроэлектромеханических систем (МЭМС). При разработке новых гироскопов класса обобщенного маятника Фуко требуется тщательный учет динамических эффектов, возникающих из-за особенностей технологии изготовления чувствительных элементов, конструктивного исполнения и условий функционирования на подвижном основании. В целях исследования динамических характеристик опытных образцов вибрационных гироскопов разработан программный комплекс для измерения и анализа первичных данных о колебаниях чувствительных элементов в виде тонкого упругого кольца и тонкой цилиндрической оболочки. Для измерения данных о колебаниях чувствительных элементов гироскопов применяется система электромагнитных или емкостных датчиков, управляемых программируемой логической интегральной схемой. Разработанное программное обеспечение обеспечивает выделение основной рабочей формы колебаний чувствительного элемента гироскопа, определение частот собственных и вынужденных колебаний, построение амплитудно-фазочастотных характеристик. В докладе проведен анализ быстродействия и точности различных алгоритмов обработки первичных данных, основанных на методе наименьших квадратов, вейвлет-анализе и алгоритмах фильтрации калмановского типа.

Для отладки программного обеспечения гироскопов разработаны программные модули на языке MS Visual C++ 3.0 для платформы MS.NET 3.5. операционной системы Windows XP/Vista. Приведены результаты стендовых испытаний опытных образцов гироскопов и даны рекомендации по повышению точности измерений волновой картины колебаний.

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

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОБОТА ТИПА EXPLINER ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛЭП

Работа посвящена исследованию и компьютерному моделированию движения робота типа Expliner, предназначенного для сканирования высоковольтных линий электропередач. Большинство линий передач эксплуатируются больше полвека, и необходимость их автоматизированного обследования является важной актуальной задачей [2]. Рассматриваемый робот представляет собой механическую систему с восемью степенями свободы. Робот состоит из двух кареток, катящихся по проводам линии передач, которая остается в штатном режиме под напряжением, и двухзвенного манипулятора с противовесом на конце второго звена [4]. Для сканирования ЛЭП робот оснащен специальными лазерными датчиками, предназначенными для определения наличия коррозии и оплавления проводов, а также видеокамерами с высоким разрешением для обнаружения видимых механических повреждений. Все данные записываются для принятия необходимых мер и для последующего сравнительного анализа при повторном сканировании линии. В штатном режиме движения робота предполагается, что он перемещается по ЛЭП с постоянной скоростью [1]. При подходе робота к мачте опоры, удерживающей провода, робот смещает положение своего центра масс при помощи двухзвенного манипулятора с противовесом на конце второго звена. Он зависает на одной каретке, а вторая каретка при этом приподнимается над линией передачи и разворачивается, позволяя роботу обойти препятствие. Далее робот, используя свой двухзвенный манипулятор, меняет положение центра масс за счет перемещения противовеса в противоположную сторону и зависает теперь на второй каретке, которая уже миновала препятствие. Первая каретка разворачивается, а робот продвигается на второй каретке и, таким образом, полностью обходит препятствие [4]. Компьютерное моделирование движения данного устройства выполнено при помощи программного комплекса UM [3] и содержит решение ряда прямых и обратных задач геометрии движения на различных фазах движения робота.

Литература

1. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.

2. **Макаров И.М., Топчеев Ю.И.** Робототехника. История и перспективы. М.: РАН и издательство «Наука», 2003.

3. **Погорелов Д.Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 1997.

4. **http://www.hibot.co.**jp/#no_1

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

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Решается задача создания мобильного робота, следующего за объектом. При создании системы слежения робота проведен анализ различных вариантов ее реализации, рассмотрены преимущества и недостатки методов и на основании результатов анализа выбрана система технического зрения (СТЗ) [1]. Эта система накладывает определенные ограничения на объект слежения, которые учтены в процессе работы над проектом.

В ходе разработки программного обеспечения робота были изучены основные принципы работы СТЗ, способы кодирования изображений и представления цвета в цифровой технике. Выбраны инструменты формирования программного кода. При составлении алгоритма обработки изображения использована библиотека компьютерного зрения Open CV [1], которая значительно облегчает задачу создания программного обеспечения. Предложенный алгоритм позволяет выделить интересующий объект на изображении, полученном с видеокамеры, и определить его положение в пространстве.

Для создания робота был выполнен подбор электронных и механических компонентов, найден способ управления двигателями постоянного тока слаботочными сигналами контроллера [2], разработана электронная схема соединения компонентов и решен вопрос компоновки элементов с учетом требований к конструкции, накладываемых системой технического зрения. Изучены принципы организации радиосвязи [3] робота, с устройством обработки изображения, и решена проблема возможной потери сигнала. Проведено тестирование построенного робота и на основе результатов выполнена отладка написанных алгоритмов.

Актуальность данного исследования заключается в перспективности развития систем технического зрения в робототехнике. Человек получает до 90 % информации через зрение, что говорит о возможности создания робота, алгоритмы действия которого будут построены исключительно на СТЗ.

Литература

1. **Bradski Gary, Kaehler Adrian.** Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 2008.

2. **Перебраскин А.В.** Микросхемы для управления электродвигателями. М.: ДОДЭКА, 1999.

3. **Левичев В.Г.** Радиопередающие и радиоприемные устройства. М.: Воениздат, 1974.

А.А. Лукин, студ.; рук. Н.В. Осадченко, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА ВИОЛЫ—ДЖОНСА

В работе рассматривается задача управления квадрокоптером с установленной на нем системой машинного зрения.

Квадрокоптер представляет собой летательный аппарат с четырьмя винтами, каждый из которых приводится в движение собственным двигателем, причем половина винтов вращается по часовой стрелке, половина — против. Квадрокоптер, рассматриваемый в данной работе, оборудован двумя видеокамерами: фронтальной и нижней. На нем также установлены инерциальная навигационная система и дальномер для измерения расстояния до пола.

Программное движение, которое необходимо реализовать квадрокоптеру, включает четыре этапа:

– взлет квадрокоптера с точки старта на высоту, позволяющую передней камере обозревать поверхность пола;

– поворот квадрокоптера вокруг вертикальной оси, пока в камеру не попадет зона посадки;

– полет к зоне посадки, пока место посадки не попадет в нижнюю камеру;

– зависание над центром места посадки с последующим приземлением.

Для детектирования места посадки применяется алгоритм Виолы—Джонса [1, 2]. Данный алгоритм предусматривает, что для изображений используется интегральное представление, поиск нужного объекта ведется по признакам Хаара. Для выбора наиболее подходящих признаков искомого объекта применяется бустинг, все признаки поступают на вход классификатора [3], который дает информацию о том, найден объект или нет. При обучении классификатора признаки группируются в каскады, что важно для быстрого отбрасывания окон, где не найден объект. Хотя обучение классификаторов идет медленно, но в целом алгоритм обеспечивает весьма быстрый поиск объекта.

На основе результатов исследований может быть реализовано заданное программное движение квадрокоптера.

Литература

1. **Viola P., Jones M.J.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proc. of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition. Washington: IEEE Computer Soc., 2001.

2. **Viola P., Jones M.J.** Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision, 2004.

3. **Шапиро Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.

В.В. Мержанов, студ.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

В данной работе рассмотрен поэтапный процесс разработки захватного устройства (ЗУ) [1], впоследствии установленного на конкретный мобильный робот. Исходя из поставленной задачи основу работы составляют этапы выбора конструкции и компонентов, технологический процесс изготовления деталей устройства и их доработка. На этапе проектирования были решены следующие задачи:

1. Выбор конструкции захватного устройства, удовлетворяющей заданным требованиям.
2. Выбор привода ЗУ и подходящего источника питания.
3. Изучение способов управления приводом.
4. Подбор материала и способа изготовления захватного устройства.
5. Разработка способа крепления ЗУ к мобильному роботу.

Промежуточным этапом разработки было создание прототипа, после анализа работоспособности которого конструкция устройства была доработана. Отличительной особенностью полученного захватного устройства является то, что его детали изготовлены методом лазерной резки, что позволило добиться высокой точности исполнения.

Мобильный робот — его конструкция, основные узлы и способы управления — рассматривается в работе и как элемент манипулятора, и как платформа для установки захватного устройства. Был проведен анализ динамики мобильного робота [2] и кинематики захватного устройства. Для создания управления было модифицировано управляющее ПО робота и создана программа, демонстрирующая возможности мобильного робота с установленным захватным устройством.

Полученное захватное устройство существенно расширяет спектр применения мобильного робота. С установкой ЗУ такой робот, обладающий системой технического зрения [3], может быть использован для решения логистических задач, таких как перемещение заданного объекта на необходимое расстояние.

Литература

1. **Юревич Е.И.** Основы робототехники. СПб: БХВ-Петербург, 2005.

2. **Мартыненко Ю.Г.** Динамика мобильных роботов // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6.

3. **Отений Я.Н., Ольштынский П.В.** Выбор и расчет захватных устройств промышленных роботов / под ред. Н.А. Толоченко, Н.Г. Неумолина. Волгоград: РПК «Политехник», 2000.

А.В. Николаев, студ.; рук. В.Ф. Устинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С НАКАТОМ ПЬЕЗОЛЕНТЫ БИМОРФНОГО ТИПА

В данной работе рассматривается модель позиционного устройства [1], элементами которого являются: слайдер, совершающий поступательные движения вдоль направляющих, гибкая, нерастяжимая, невесомая лента, один конец которой шарнирно связан со слайдером, а другой закреплен на неподвижной подложке. Слоистая структура ленты (пьезокерамика с напыленным электродом — металл) образует биморфный пьезоактюатор.

При электрическом нагружении актюатора вследствие обратного пьезоэффекта в сечениях ленты реализуется продольно-поперечный изгиб, при котором часть ленты накатывается [2] на подложку. При этом масса слайдера получает линейное перемещение вдоль направляющих.

Процедура моделирования динамики позиционного устройства включает:

- определение статической характеристики пьезоактюатора, которая строится при решении вспомогательной модельной задачи о цилиндрическом изгибе биморфной пластины в квазистатической постановке;
- составление и последующее приближенное интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений краевой задачи продольно-поперечного изгиба ленты для определения реакций, действующих на слайдер;
- составление и численное интегрирование дифференциального уравнения с нелинейной правой частью начальной задачи о движении слайдера.

По результатам численного анализа определены кинематические характеристики движения слайдера (ускорение, скорость, перемещение) для различных значений упругомассовых и электрических параметров позиционных устройств.

Литература

1. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Анализ динамики разгона и квазиустановившегося режима электростатического планарного устройства // Вестник МЭИ. 2012. № 1.

2. **Дятлов В.Л., Косцов Э.Г.** Планарные пленочные электростатические и пьезоэлектрические двигатели // Автометрия. 1996. № 2.

В.В. Похожай, студ.; рук. В.Ф. Устинов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ УПРУГОГО МИНИ-РОБОТА В ТРУБЕ С КУСОЧНО-ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНОЙ

Настоящая работа посвящена моделированию движения упругого мини-робота в трубе с прямолинейным и тороидальным участками. Предполагаемое назначение мини-робота — диагностика внутренней поверхности трубы.

Мини-робот моделируется трехопорным неразрезным упругим стержнем, который может двигаться по направляющим кривым специальной формы. Вид направляющей образуется комбинацией двух кривых, заданных на внутренней поверхности трубы: скелетной (постоянной кривизны на прямолинейном участке, переменной на тороидальном) и периодической кривой. Причем скелетная линия является винтовой с постоянным углом подъема.

Для осуществления автономного движения мини-робота в трубе предлагается новый тип привода, отличающийся от известных в практике [1], движущая сила которого создается благодаря управлению формой стержня.

С целью реализации указанного принципа предполагается трехслойная конструкция стержня (пьезокерамика — металл — пьезокерамика), которая в сочетании с электродами образует триморфный пьезоэлектрический актюатор. Квазистатическая характеристика пьезоактюатора определяется при решении вспомогательной модельной задачи о чистом изгибе триморфной пластины.

При моделировании динамики управляемого движения робота с учетом сил вязкого трения в случае невесомого и весомого стержня используется формализм Лагранжа. В случае весомого стержня для определения перемещения используется разложение по собственным функциям изгибных колебаний неразрезного трехопорного стержня. При этом уравнения движения приводятся к системе нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

В результате численного решения системы нелинейных уравнений определены время выхода мини-робота на квазиустановившийся режим, средняя скорость движения робота вдоль скелетной кривой и уровень неравномерности скорости, а также зависимость данных величин от соотношения значений упругомассовых и геометрических параметров системы.

Литература

1. **Механика** миниатюрных роботов / В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Л.Ф. Фомин, В.Г. Чащук. М.: Наука, 2010.

А.М. Русаков, студ.; рук. Г.В.Панкратьева, к. ф.-м.н., доц.,
(НИУ «МЭИ»)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ РОБОТА «ТРИПОД»

В работе проведен анализ кинематики и динамики робота-манипулятора «Трипод» с параллельной кинематикой, разработанного компанией ФЕСТО. Исследование выполнено с помощью компьютерного моделирования в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor. Результаты компьютерного моделирования могут быть использованы для управления движением реального робота.

Построенная трехмерная компьютерная модель робота «Трипод» с тремя степенями свободы учитывает основные конструктивные особенности реального объекта, в том числе устройство соединений подвижных элементов манипулятора [1]. Модель состоит из неподвижного основания с направляющими, по которым перемещаются каретки, соединенные с рабочей платформой манипулятора при помощи тяг.

На основе полученной модели решена прямая задача кинематического управления и определена рабочая область манипулятора [2]. Рассмотрен ряд частных случаев движения механизма, построены траектории движения схвата и соответствующие графики [3].

Найдены условия позиционирования, т.е. определены величины сил, необходимых для удержания манипулятора в заданном положении. Проведен сравнительный анализ условий позиционирования при различных положениях схвата.

Исследована устойчивость равновесных положений робота. Вывод об устойчивости позиционирования сделан на основе анализа траекторий движения схвата в окрестности положения равновесия при значениях сил, полученных из условия позиционирования робота в данном положении.

Определены усилия в приводящих тягах в зависимости от положения схвата, величины и направления внешней нагрузки, действующей на рабочую платформу.

Результаты моделирования представлены в виде видеоматериала, полученного благодаря возможностям системы автоматического проектирования Autodesk Inventor.

Литература

1. **Алиева Н.П., Сенченкова Л.С., Журбенко П.А.** Трехмерное моделирование в Autodesk Inventor. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2012.

2. **Merlet J.P.** Parallel robots (second edition). Netherlands: Springer, 2006.

3. **Панкратьева Г.В., Романов Д.Б.** Управление движением захвата робота-манипулятора (трипода) EXPT фирмы FESTO // Вестник МЭИ. 2012. № 1.

Е.Л. Созинова, студ.; рук. А.В. Корецкий, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ДВУХ СЕМИЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Данная работа посвящена компьютерному моделированию движения робототехнического комплекса (РТК), обладающего 17 степенями свободы. Рассматриваемый комплекс состоит из двух семизвенных манипуляторов, смонтированных на едином корпусе, который в свою очередь имеет три степени подвижности относительно трех взаимно ортогональных осей координат, связанных с неподвижным основанием.

Потребность в разработке подобных устройств связана с необходимостью выполнять определенные работы в сложных и порой опасных для здоровья человека условиях, поэтому исследование механических систем такого типа является важной актуальной задачей.

Первенство в разработке таких комплексов принадлежит фирмам Motoman и ABB. Последней новинкой от компании Yaskawa Electric для промышленных целей стал робот Motoman SDA10 (аббревиатура расшифровывается как Slim Dual Arm) [3], который стал прототипом исследуемого в данной работе комплекса.

В работе проведен кинематический анализ комплекса, в ходе которого получено решение ряда прямых и обратных задач кинематики для каждого манипулятора в отдельности, а также их синхронной совместной работы [1]. В частности, смоделировано движение робота при готовке жареной лепешки. Робот с кухонными лопатками в захватных устройствах манипуляторов подводил лопатки с противоположных сторон к жареной лепешке, подхватывал ее на лопатки и переворачивал.

Компьютерное анимационное моделирование движения данного устройства проведено при помощи программного комплекса «универсальный механизм — UM» [2]; оно включает решение ряда прямых и обратных задач кинематики на различных этапах движения как правого, так и левого манипуляторов и в ходе их синхронной совместной работы.

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. **http://www.motoman.com**.ru/

А.В. Сопиков, студ.; рук. Д.В. Шилин, вед. инж. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ШТАМПОВОЧНОГО ПРЕССА

Тема автоматического управления работой производственных машин является актуальной в наше время в связи с необходимостью повышения производительности труда на предприятиях. Одной из таких машин является штамповочный пресс, позволяющий выполнять операцию штамповки по заранее заданным координатам на листовом материале.

В работе разработана система программного управления на базе программируемого логического контроллера 313C-2DP фирмы Siemens [1], обладающего высоким быстродействием и точностью. Проведено моделирование системы привода, внешний вид которого показан на рис. 1.

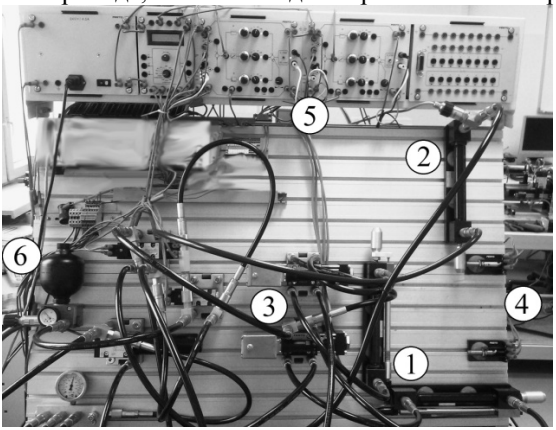


Рис. 1. Внешний вид модели привода

На рис. 1 обозначены следующие наиболее важные позиции: *1* — гидроцилиндры с потенциометрическими датчиками (координатные); *2* — прессовый гидроцилиндр; *3* — пропорциональные распределители; *4* — индуктивные датчики; *5* — PID-регуляторы; *6* — фильтр.

Разработанная система позволяет получать отверстия произвольной формы по заданным координатам с высокими показателями качества. Благодаря использованию гидравлического привода система является надежной и энергоэффективной.

Литература

1. **Справочное** руководство по программированию SIMATIC на языке STL для S7-300 и S7-400. Siemens AG, 2004.

А.С. Степанов, студ.; рук-ли В.В. Подалков, д.т.н., проф.,
Е.С. Сбытова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С РЕЗОНАТОРОМ В ВИДЕ УПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ

Использование микромеханических гироскопов (ММГ) [1—4] позволяет решать проблему преобразования существующих и создание принципиально новых систем ориентации, стабилизации, навигации и управления объектов различного назначения, обеспечивает улучшение их тактико-технических характеристик. Применение ММГ позволяет создавать малогабаритные системы ориентации и навигации невысокой стоимости для летательных аппаратов различного назначения, мобильных роботов, судов, автомобилей.

В настоящей работе объектом исследования является ММГ камертонного типа. Чувствительный элемент динамической модели указанного ММГ представляет собой четыре упругих нерастяжимых стержня. Рамка, на которой жестко закреплены стержни, посредством упругой балки соединена с основанием, вращающимся с произвольной угловой скоростью.

С использованием принципа Гамильтона—Остроградского и вариационных уравнений Эйлера получены нелинейные дифференциальные уравнения движения чувствительного элемента микромеханического гироскопа.

Построено решение линейных уравнений свободных колебаний чувствительного элемента. При этом приняты во внимание силы внутреннего трения в материале. Рассмотрены случаи постоянных и медленно меняющихся параметров математической модели. Выполнено численное моделирование.

Получено аналитическое решение уравнений вынужденных колебаний, построены амплитудно-частотные характеристики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты: 12-01-00939-а, 12-08-01255-а).

Литература

1. **Вопилкин Е.А.** Возможности микроэлектромеханических систем: пер. с англ. // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1 (102).

2. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985.

3. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

4. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007.

К.И. Тимченко, студ.; рук. А.В. Корецкий, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАРСОХОДА МИССИИ «ЭКЗОМАРС»

Данная работа посвящена исследованию и компьютерному моделированию движения шестиколесного мобильного робота. В соответствии с программой миссией «Экзомарс» на робот возлагается задача бурения скважины глубиной в два метра. Такой эксперимент планируется провести впервые в истории изучения Красной планеты с целью выявления возможных следов биологической жизни на Марсе. Предполагается, что такой робот должен быть оснащен необходимой буровой установкой для выполнения поставленной цели. Миссия, запланирована на 2018 год [1].

Поскольку рассматривается исследовательский ровер нового поколения, который планируется доставить на поверхность планеты Марс, то не возникает никаких сомнений, что данная работа является вполне актуальной.

Рассматриваемая конструкция ровера представляет собой механическую систему, имеющую 44 степени свободы: ходовая часть имеет 25 степеней свободы, буровая установка — 10; блок видео — 4; панели солнечной батареи в совокупности имеют 5 степеней свободы.

Для выполнения поставленной основной задачи мобильный робот оснащен необходимой буровой установкой. За один проход (при неизменном положении турели) бур может углубиться в грунт на полметра, затем турель поворачивается, создавая условия для очередного прохода бура (всего предусмотрено четыре таких прохода) [2].

Компьютерное моделирование (как движения марсохода, так и работы его буровой установки) осуществлено при помощи программного комплекса UM; оно включает решение ряда прямых и обратных задач кинематики на различных фазах движения как ровера, так и буровой установки [3].

Литература

1. **Макаров И.М., Топчеев Ю.И.** Робототехника. История и перспективы. М.: Наука, 2003.

2. **http://www.link2universe.net**/2012-11-22/exomars-ok-alla-collaborazione-tra-esa-e-roscomos-per-il-nuovo-rover-marziano-europeo/

3. **Корецкий А.В., Осадченко Н.В.** Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Издательство МЭИ, 2000.

А.И. Тырсина, студ.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ МОБИЛЬНОГО МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

При разработке транспортной логистики мобильного манипуляционного робота встает задача планирования траектории. Для решения этого вопроса рассматривается модельная задача захвата и транспортировки объекта роботом, в которой применяются алгоритмы планирования движения с учетом возможности появления препятствий на пути следования. При этом предварительно готовится карта местности, по которой будет передвигаться мобильный робот, выбирается планировщик движения, ограничивается область, в которой будет перемещаться робот, реализуется алгоритм планирования. В работе [1] решалась модельная задача захвата и транспортировки объекта мобильным роботом, в которой для алгоритма планирования движения робота использовался алгоритм «поиска в ширину» (Breadth first search).

Решение задачи было разбито на пять этапов:

1. Построение кратчайшего пути от текущего положения мобильного робота к искомому объекту.
2. Движение по построенной траектории.
3. Сближение с объектом в условиях прямой видимости.
4. Захват объекта с помощью установленного на роботе схвата.
5. Транспортировка объекта роботом к пункту назначения.

В представленном докладе описывается сближение с объектом и алгоритм его захвата. Алгоритм захвата объекта начинает работать в тот момент, когда робот уже находится на небольшом расстоянии от целевого объекта. Важным условием захвата является обеспечение прямой видимости, так как захват осуществляется по данным датчиков расстояния, установленных на роботе.

Литература

1. **Тырсина А.И.** Алгоритм транспортной логистики для мобильного манипуляционного робота // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тр. XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

Направление

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —

директор ИЭЭ, член-корр. РАН
П.А. Бутырин

Секция 51

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — к.т.н., доцент О.Н. Кузнецов
Секретарь секции — ассистент А.Н. Шаров

Конференция проводится при информационной поддержке РНК СИГРЭ (http://cigre.ru/)

И.Л. Баранов, асп.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УЗЛАХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Для снижения стоимости и ускорения принятия обоснованного решения из множества альтернатив применяются экспертные системы. Для выбора пунктов контроля показателей качества электроэнергии (ПКЭ) авторами предлагается формализованный подход на основании построения ранжированных оценок предпочтений об установке средств измерений (СИ) в узлах энергосистем.

Особенностью метода является получение таких интегральных экспертных заключений на основании обобщенных параметров сети и информации о нагрузках электрической сети, которые идентичны заключениям, получаемым на основании проведения испытаний КЭ на ПС электрической сети. Метод имеет три уровня точности, выбор из которых проводится исходя из имеющихся исходных данных. Соответствующие друг другу блоки методов взаимозаменяемы. Также предлагается система весовых коэффициентов, учитывающих приоритетность ПКЭ.

Рассмотренный случай групповой суммарной экспертной оценки на основании чувствительности показал коэффициент ранговой корреляции Спирмена (КРКС) равным 1, аналогично на основании статистических данных 0,909 (пороговое значение $\varepsilon_{0,05}^{11}$= 0,523); дополнение весовыми коэффициентами не ликвидировало линейной связи ранжировок и для случая линейной свертки оценок КРКС составил 0,973 для оценки на основании чувствительности и 0,559 — для статистической оценки. Введение коэффициентов искажающей нагрузки позволило уйти от линейной связи медианы и результирующей ранжировки на основании чувствительности, обеспечив совпадение аналитически полученных результатов на основании чувствительности узлов ЭЭС с результатом на основании статистик.

Дальнейшее развитие метода допускает учет требований к контролю КЭ в узлах ЭЭС в соответствии с договорами на присоединение, передачу электрической энергии и положениями действующей нормативной базы [1, 2].

Литература

1. **ГОСТ Р 54149—2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2012.

2. **ГОСТ 13109—97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Минск: ИПК «Изд-во стандартов», 1998.

А.И. Брижатая, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДАЛЬНЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВН, ОСНАЩЕННОЙ УСТРОЙСТВАМИ FACTS

В условиях рыночных отношений, когда цель работы энергосистем — это максимальная прибыль при минимальных затратах, актуальным становится улучшение уже существующих ЛЭП за счет увеличения пропускной способности и управления режимами их работы.

Проблемы, стоящие перед энергетикой, такие как недостаточные пропускные способности отдельных линий электропередачи и сетей в целом; недостаточное оснащение электроэнергетических систем и электрических сетей, в частности регулируемыми источниками реактивной мощности [1], требуют современных решений, одним из которых является применение управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока — Flexible AC Transmission System (FACTS).

В данной работе исследуются режимы работы дальней электропередачи сверхвысокого напряжения, оснащенной устройствами FACTS — управляемыми шунтирующими реакторами (УШР), которые обладают рядом достоинств: возможностью поддержания напряжения, снижения потерь активной мощности, увеличения запаса статической устойчивости.

Для целей исследования были выбраны и рассмотрены несколько возможных схем включения УШР совместно с установкой продольной емкостной компенсации (УПК) (Т-образная и П-образная), установленные в средней точке линии. Расчеты проведены для различных длин линий.

Для проведения необходимых исследований была разработана математическая модель электропередачи с использованием компьютерных пакетов визуального программирования Simulink (MatLab).

Во всех режимах работы электропередачи величина напряжения по всей линии оставалась в допустимых пределах, при этом увеличение пропускной способности электропередачи при 50 % компенсации длин линий 700—1200 км составило более 40 %.

На основании полученных результатов показана эффективность применения УШР для стабилизации напряжения в точке подключения к УПК в различных режимах работы протяженной электропередачи и повышения ее пропускной способности.

Литература

1. **Кочкин В.И.**, **Шакарян Ю.Г**. Применение гибких (управляемых) систем электропередач переменного тока в энергосистемах. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011.

О.В. Варданян, студ.; рук. Ю.В. Шаров, к.т.н., проф.;
конс. Е.Ю. Свешникова, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ РОСТА НАГРУЗКИ В АРМЕНИИ

В городе Гюмри (Армения, Ленинакан) строится район для жителей, которые стали бездомными в результате землетрясения в 1988 году. Район называется «Муш», строительство началось в 2010 году, оно постепенно развивается, построены уже 32 дома с 1724 квартирой, на территории района строятся также школы, детские сады, магазины и т.д.

В результате обзора литературы было установлено, что в связи с развитием района наиболее актуальным вопросом для повышения качества электроэнергии является анализ установившегося отклонения напряжения.

Установившееся отклонение напряжения — это отличие фактического напряжения в установившемся режиме работы системы электроснабжения от его номинального значения. Причиной отклонения напряжения в той или иной точке сети является изменение графика нагрузки узла, баланса реактивной мощности, падения напряжения участках сети, коэффициента трансформации трансформатора. Отклонение напряжения влияет на работу технологических установок, освещения и электропривода [1].

Предполагается рассчитать отклонения напряжения на шинах 0,4 кВ самого электрически удаленного и самого электрически близкого ТП, а так же допустимый диапазон установившегося отклонения напряжения.

Предполагается провести выбор диапазона регулирования РПН на трансформаторах районной подстанции в нормальном и послеаварийном режимах, удовлетворяющего допустимым отклонениям напряжения у потребителей 0,4 кВ, а также определить допустимый диапазон присоединенных мощностей на уровнях напряжения 10 и 0,4 кВ с поддержанием отклонения напряжения в заданных пределах.

Для проведения данных расчетов была составлена схема замещения и расчетная схема исследуемого района.

Оканчательный вывод о соответствии отклонения напряжения делается на основании требований ГОСТ 13109—97.

Литература

1. **Управление** качеством электроэнергии: учебное пособие для вузов / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.Н. Шарова. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 354 с.

Р.Ф. Галиев, студ.; рук. А.М. Маклецов, к.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА

На сегодняшний день более половины суммарных потерь электроэнергии приходится на долю распределительных сетей. Очевидно, что решение существующей проблемы выглядит очень перспективным направлением всей отрасли.

Трансформаторы с продольно-поперечным регулированием в России получили применение лишь на нескольких подстанциях 750/330 кВ, что связано с трудностями принципиального порядка: нейтраль трансформаторов в сверхвысоковольтных сетях должна быть заземлена; несколько РПН регулировочных трансформаторов снижает надежность и быстродействие всего трансформаторного агрегата.

Данная работа рассматривает вопрос целесообразности применения трансформаторов с продольно-поперечным регулированием (ППР) напряжения (регулирование модуля и фазы) в распределительных сетях кольцевого типа с целью снижения потерь активной мощности. ППР позволяет оптимизировать потоки активной и реактивной мощностей путем регулирования активной и реактивной составляющих коэффициента трансформации специального вольтодобавочного трансформатора (ВДТ), обеспечивая экономичное распределение потоков и, как следствие, значительное снижение потерь электроэнергии. Были проведены серии расчетов, которые показали, что с применением предложенного метода можно добиться снижения потерь в отдельных случаях на 40 % и более.

По результатам исследований уровень снижения потерь электроэнергии предлагаемым методом сильно зависит от разности фаз центров питания. Напряжения центров питания, обеспечивающие минимум потерь активной мощности, как правило, не отличаются более чем на 1—2 %, а оптимальная разность фаз — 1—3 градуса.

Целесообразность применения ВДТ определяется после выполнения работ по оценке существующих сетей и возможности производства ВДТ со стоимостью, обеспечивающей приемлемый срок его окупаемости.

Литература

1. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. **Герасименко А.А., Федин В.Т.** Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие. Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006.

М.Ю. Гамзин, студ.; рук. И.С. Пономаренко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТДЕЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В эксплуатации современных распределительных сетей 6-10-20/0,4 кВ одной из важнейших задач является правильный учет потерь электроэнергии. Реальные технологические потери в сетях, обусловленные структурой сети и ее техническим положением, составляют, как правило, 5—6 % общего потребления, коммерческие же потери могут составлять 10—20 %. Наличие последних в сети вызвано неправильной организацией системы учета электроэнергии. Одним из важнейших этапов решения этой проблемы является задача моделирования и прогнозирования электрических нагрузок. Выполнение данной задачи можно обеспечить с помощью использования автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (далее АСКУЭ).

Модели, используемые сегодня для моделирования нагрузок отдельных потребителей, отличаются низкой точностью (используются коэффициенты спроса, использования и т.д., основанные на общих вероятностных методах анализа случайных величин), что приводит к ошибочным результатам при оценке потерь электроэнергии в сети. Отсюда возникает задача практической реализации модели электрической нагрузки отдельных потребителей, которая отличалась бы приемлемой точностью описания реальной нагрузки и, с другой стороны, была бы достаточно проста для ее практического применения. При этом от вероятностных характеристик случайных величин предполагается перейти к моделированию вероятностных процессов, методология которых позволяет описывать анализируемые процессы с более высокой точностью (до 20—30 % по предварительным результатам)

Реализация проводится на базе программного комплекса «ЭРИС-ПО»: сбор информации из базы данных (БД) АСКУЭ по каждому счетчику (графики P, Q, U, суточное значение энергии); внедрение информации в БД «ЭРИС-ПО» с возможностью классификации по часам, суткам (рабочие, праздничные, предпраздничные дни) месяцам, по типам нагрузки; анализ полученной информации.

Полученные данные будут использоваться для расчета технологических потерь в сети с гораздо большей точностью, чем в настоящий момент. Кроме того, они будут использованы в целях снижения коммерческих потерь электроэнергии.

Л.А. Грызунова, студ.; рук. В.А.Строев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В современных энергосистемах особое внимание уделяется вопросам обеспечения устойчивости и необходимого качества переходных процессов при больших возмущениях. Эти проблемы решаются в основном рациональным выбором системы автоматического регулирования и управления, поэтому учет переходных процессов в самих системах автоматического регулирования является важной задачей при разработке программ расчета переходных процессов.

Как известно, математическое описание ЭЭС для расчетов электромеханических переходных процессов и динамической устойчивости состоит из двух групп уравнений: системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в динамических элементах ЭЭС и системах автоматического регулирования, и системы алгебраических уравнений, описывающих электрическую сеть ЭЭС. Подсистема дифференциальных уравнений нелинейна, и ее решение может быть получено только в численном виде.

Одним из способов представления АРВ СД является система дифференциальных уравнений. В этом случае значительно увеличивается порядок дифференциальных уравнений, кроме того, эта система становится жесткой. Поэтому для точного отражения действия регуляторов в расчетах электромеханических переходных процессов требуется использование малого шага интегрирования, что приводит к увеличению времени расчета. Снизить порядок системы уравнений и исключить уравнения с малыми постоянными времени позволяет представление элементов регулятора с помощью интеграла Дюамеля. В этом случае входной сигнал регулятора представляется в виде дискретных значений, меняющихся по определенному закону, что приводит к увеличению погрешности расчета.

Результаты расчетов показали, что использование модели регулятора на основе интеграла Дюамеля и расчете с шагом интегрирования и шагом дискретизации, равным 0,05 с позволяет без заметной погрешности быстро и надежно рассчитать переходный процесс. Данное представление регулятора возбуждения может существенно сократить порядок решаемой задачи при сохранении точности, а также позволит расширить область применения расчетов переходных процессов на оценку эффективности средств улучшения динамической устойчивости в темпе процесса.

Д.В. Дворкин, студ., А.Д. Демидов, соиск.;
рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В настоящее время растут требования потребителей к качеству электроэнергии, предъявляются претензии к сбытовым и сетевым компаниям [1], что ведет к штрафам за несоответствие КЭ нормативным требованиям, в частности к уровням искажения синусоидальности напряжения питающей сети. Становится актуальным применение средств компенсации этих искажений.

Среди средств компенсации искажения синусоидальности напряжения набольшее распространение получили пассивные фильтры. Развитие промышленной электроники позволило создать активные фильтры, которые обладают высокой стоимостью, но при этом способны обеспечивать качество электроэнергии по большему количеству показателей. В этих условиях необходимо иметь методику, позволяющую определять место установки средств компенсации искажений, их мощность и тип.

Для решения данной задачи с помощью программно-вычислительного комплекса MatLab проведено математическое моделирование участка сети, содержащей различные источники помех [2]. Сопоставление результатов моделирования и инструментальных измерений в рассматриваемой сети позволяет сделать вывод о высокой достоверности математической модели. Серия расчетов с помощью разработанной модели и техника экономическая оценка показали, что применение последовательных активных фильтров наиболее целесообразно при централизованной компенсации искажений ввиду их большей мощности и, напротив, параллельные активные фильтры более целесообразны при локальной компенсации искажений (снижается вероятность перегрузки фильтров токами высших гармоник). Пассивные фильтры возможно применять и при централизованной и локальной компенсации помех.

Полученные результаты могут быть применены для оптимизации режимов работы электрических сетей по качеству электроэнергии.

Литература

1. **Чэпмэн Д**. Цена низкого КЭ // Энергосбережение. 2004. № 1.

2. **Черных И.В**. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.: ил.

Д.В. Джулакян, студ.; рук. Ю.В. Шаров, к.т.н., проф.;
конс. Е.Ю. Свешникова, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВ ПО ЛЭП 220 кВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ АРМЕНИИ

Энергосистема Армении содержит 1323 км ЛЭП и 14 электростанций с напряжением 220 кВ, 3169 км ЛЭП и 119 электростанций с напряжением 110 кВ.

До распада СССР армянская энергосистема являлась частью объединенной энергосистемы Закавказья, которая, в свою очередь, была частью объединенной энергосистемы СССР.

В начале 1990-х годов Армения пережила энергетический кризис. В этих условиях обеспечить минимально необходимое для существования страны количество электроэнергии смогли лишь гидроэлектростанции.

Поскольку сейчас Республика Армения находится на стадии выхода из кризиса, предполагается обновление уже существующих заводов, введение новых промышленных мощностей.

В работе проводятся расчеты для всей ЭЭС Армении.

Предполагается рассмотреть режимы работы ЭЭС Армении в современных условиях, существующие проблемы и способы их решения. Для исследования сети будет сформирована расчетная модель ЭЭС Армении. Используя данные (нагрузка потребителей, длина и сечение линий электропередач, количество генераторов и их установленные мощности), которые были получены от диспетчерского управления Армении, модель будет сформирована в программном комплексе RastrWin.

Сделан предварительный анализ перетоков мощностей, и установлено, что имеется избыток генерируемой мощности.

Предполагается рассчитать предельные режимы по передаче мощности по воздушным линиям 220 кВ, которые ограничиваются по нагреву и статической устойчивости.

Литература

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнерг. спец. вузов. — 4-е изд., перераби. и доп. М.: Высшая школа, 1985. — 536 с.

2. **Шелухина Т.И.** Расчеты нормальных и предельных по мощности установившихся режимов сложных энергосистем: учебное пособие. М.: Издательство МЩИ, 2005. — 52 с.

О.С. Добкин, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

На сегодняшний день в мировой практике активно внедряются информационные технологии при автоматизации объектов энергетики [1]. Внедрение автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) позволяет снизить нагрузку на диспетчера и повысить надежность управления энергосистемой за счет создания инструмента обратной связи, в роли которого и выступает АСУ ТП [2].

В современной информационной среде критическим становится вопрос безопасности, так как вторжение в систему технологического управления может повлечь за собой серьезные последствия [3]. Актуальной является проблема обеспечения достоверности параметров технологического процесса и, как следствие, надежности оперативного управления.

В рамках работы проведены теоретические исследования предметной области, в частности рассмотрены различные архитектуры построения АСУ ТП ПС и характерные для них угрозы в контексте обеспечения технологической безопасности, способы реализации данных угроз (проведено моделирование аварийной ситуации) и существующие меры противодействия. Рассмотрены инциденты технологической безопасности автоматизированных электроэнергетических объектов в ряде стран.

По результатам исследования сформирована концепция необходимых мер и средств для обеспечения технологической безопасности АСУ ТП ПС, которая включает в себя средства для обеспечения контроля целостности и достоверности передаваемой с ПС информации о параметрах технологического процесса, контроль и верификация телеизмерений; рассмотрена интеграция предлагаемой системы с существующими системами технологической и информационной безопасности.

Литература

1. **Разработка** системы передачи информации о состоянии энергетических объектов с использованием оперативного журнала энергообъекта / А.Ю. Бадалов, Д.Б. Гвоздев, В.Л. Пелымский, Б.Я. Шведин // Электрические станции. 2013. № 8.

2. **Сухарев М.Г**. Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием. М.: РГУНГ им. М.И. Губкина, 2000.

3. **Черезов А.В.** Мультиагентные технологии — новый подход к единому технологическому управлению инфраструктурами // Электроэнергия. Передача и распределение. 2013. № 4 (19).

И.Е. Иванов, соиск.; рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, УЧИТЫВАЮЩЕГО ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Продольные и поперечные параметры высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) могут изменяться в широких пределах [1], поэтому уставки устройств релейной защиты и автоматики, рассчитываемые на основе некоторых «усредненных» данных о характеристиках ВЛЭП, могут не отражать действительности. Предложенные авторами алгоритмы идентификации актуальных параметров транспонированных и нетранспонированных ВЛЭП [2] на основе технологии синхронизированных векторных измерений отражают концептуальный подход, не учитывающий ошибки измерений, всегда присутствующие на практике. Поэтому в настоящем исследовании осуществлена попытка моделирования и устранения влияния ошибок, сопровождающих векторные измерения токов и напряжений по концам ВЛЭП. Методом исследования является математическое моделирование с привлечением большого объема данных, полученных с реальных устройств синхронизированных векторных измерений.

Ошибки измерений можно разделить на систематические (прежде всего, амплитудные и угловые погрешности трансформаторов тока и напряжения) и несистематические («шум» измерений). В работе выяснено, что первые могут быть включены в модель как дополнительные неизвестные, а вторые могут быть отфильтрованы только благодаря их статистическим свойствам. Кроме того, определены приблизительные «пороги» ошибок, при которых алгоритмы идентификации параметров могут быть успешно применены. Разработанные методики и результаты моделирования представляют очень ценную информацию для практического применения алгоритмов идентификации параметров ВЛЭП в реальном режиме времени.

Литература

1. **Иванов И.Е.** К проблеме определения актуальных параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи // http://research-journal.org/: Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 4. — Режим доступа: http://research-journal.org/featured/k-probleme-opredeleniya-aktualnyx-parametrov-vysokovoltnyx-vozdushnyx-linij-elektroperedachi/ (04.03.2013).

2. **Иванов И.Е., Мурзин А.Ю.** Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров одноцепных нетранспонированных линий электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений: ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ // Специальный выпуск № 1. Иваново, ИГЭУ, 2013. — С. 325—329.

А.О. Кравцов, студ.; рук. Р.Р. Карымов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Анализ многих крупных системных аварий показывает, что многие из них (например, московская авария 2005 г.) происходили практически по одному сценарию: серьезное возмущение, затем продолжительный и спокойный период с нормальными уровнями частоты и напряжений в системе, за которым следовала лавина напряжения [1]. Длительность таких аварий составляла от десятков секунд до нескольких десятков минут.

В настоящее время для моделирования таких аварий используют программы, реализующие численное интегрирование дифференциальных уравнений, описывающих поведение генераторов и нагрузки (EUROSTAG, PSAT и др.) [1—3]. Однако с учетом длительности протекания процесса возможен и другой путь решения этой задачи. Поскольку взаимные колебания углов роторов генераторов затухают через 7—15 с, то учет взаимного движения роторов генераторов не обязателен, если за время первых качаний устойчивость не была нарушена. В этом случае такую системную аварию можно моделировать как серию последовательных установившихся режимов (УР). Вместе с тем использовать для этого промышленные программы расчета УР не возможно, так как они не позволяют учесть действия РПН трансформаторов и ограничения генераторов по токам ротора и статора. Поэтому возникает необходимость дальнейшего развития методического и программного обеспечения системных расчетов.

В работе был выполнен анализ существующих подходов к решению рассматриваемой задачи и разработана методика расчета устойчивости ЭЭС по напряжению, основанная на пошаговом расчете УР методом Ньютона с фиксацией их во времени. При расчете УР учитывается действие РПН трансформаторов. Модели генераторов учитывают их ограничения по токам ротора и статора. Сопоставление результатов расчетов тест-схемы с результатами расчетов по программе, реализующей метод численного интегрирования показало, что характер изменения параметров режима во времени совпадает, а расхождения в численных значениях не превышают 1 %.

Литература

1. **Панасецкий Д.А., Воропай Н.И.** Развитие принципов противоаварийного управления для обеспечения устойчивости по напряжению электроэнергетических систем // Электричество. 2011. № 8.

2. **Применение** компьютерной модели для анализа аварийных ситуаций в энергосистеме / Ф.Л. Коган и др. // Электрические станции. 2009. № 1.

3. **Исследования** режимов Московской энергосистемы в процессе развития аварии в мае 2005 г./ Ф.С. Герасимов и др. // Электричество. 2008. № 1.

И.Н. Кривихин, студ.; рук. Е.М. Шишков, асс. (СамГТУ, г. Самара)

АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЯХ ДВУХЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Одним из наиболее характерных элементов сети с несимметричными параметрами является протяженная нетранспонированная двухцепная воздушная линия электропередачи (ДВЛ). Несимметрия параметров ДВЛ является источником несимметрии напряжения в ее цепях.

В настоящей работе проведена оценка несимметрии напряжения на участке ДВЛ 220 кВ длиной 70 км, выполненной проводом АС-500 на опорах типа «бочка». Согласно [1] на основе результатов расчета установившегося режима линии в фазных координатах [2] определены коэффициенты несимметрии напряжения. Рассмотрен случай как встречно, так и согласно направленных потоков мощности в цепях анализируемого участка.

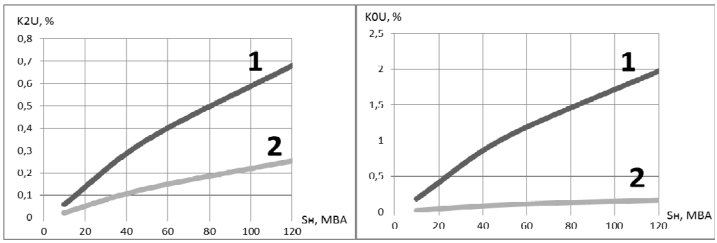


Рис. 1. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжения ДВЛ по обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательностям от потока мощности цепи ($S_н$):
1 — согласно направленные потоки мощности; *2* — встречно направленные потоки мощности

Из представленных на рис. 1 зависимостей можно видеть, что несимметрия напряжения в цепях с согласно направленными потоками мощности может достигать предельно допустимых значений, установленных [3], из-за чего возникает необходимость в мероприятиях по устранению несимметрии напряжения.

Литература

1. **ГОСТ Р 51317.4.30—2008.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии [Текст]. — Введ. 2008—12—25.

2. **Шишков Е.М.** Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. № 3. — С. 47–52.

3. **ГОСТ Р 54149—2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. — Введ. 2010—12—21.

Е.С. Кутукова, студ.; рук. А.В. Малафеев, к.т.н., доц.
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ

При наличии в региональной электроэнергетической системе (РЭЭС) крупных промышленных потребителей с собственными сетями напряжением 110—220 кВ и местными электростанциями их упрощенное представление в расчетных схемах энергосистем приводит к отклонениям расчетных параметров от действительных. Вместе с тем при расчете режима системы электроснабжения такого потребителя упрощенное представление узлов связи с РЭЭС также нежелательно в связи с невозможностью учета транзитных перетоков по сетям 110—220 кВ и влияния режима сети 500 кВ и выше. В обоих случаях не удается корректно учесть схемы выдачи мощности промышленных электростанций на различных напряжениях.

При формировании объединенной схемы для расчета методом последовательного эквивалентирования, разработанным на кафедре ЭПП МГТУ и эффективным для систем электроснабжения, возникают проблемы из-за недостаточности телеизмерений в сетях 220—500 кВ (отсутствуют замеры реактивной мощности, фазовых углов напряжений и др.) и плохой наблюдаемости потребительских сетей 35 кВ и ниже. В первом случае затруднено определение параметров узлов примыкания к соседним РЭЭС, что дает потокораспределение, далекое от действительного. Во втором случае не удается рассчитать режим сети, от которой питаются крупные электроприемники. Решение этих проблем является актуальным для планирования нормальных и ремонтных режимов и расчетов послеаварийных режимов.

В настоящей работе предлагается ликвидировать указанные недостатки за счет разработанного автором алгоритма, основанного на оценивании состояния [1]. Для сетей 220—500 кВ предлагается определять реактивную мощность по известным модулям напряжений и активной мощности. Если вместо активной мощности измеряется модуль тока, она определяется на основе псевдоизмерений. Для ненаблюдаемых районов разомкнутых сетей используется определение мощностей нагрузок по известным параметрам схем замещения и параметрам режима на головных участках.

На основе алгоритма создан модуль в составе программного комплекса — советчика диспетчера, с помощью которого выполнены расчеты режимов для Челябинской энергосистемы и Магнитогорского энергетического узла.

Литература

1. **Гамм А.З.** Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976.

А.А. Левандовский, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Использование методов оптимизации позволяет вырабатывать оптимальные управляющие воздействия на систему [1], однако в силу сложности электрических сетей, большого количества регулирующих устройств и технологических параметров необходима 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 [2]. Кроме того, современное развитие микропроцессорной техники, а также высокие издержки по телеинформатизации объектов энергосистемы позволяют сделать вывод о том, что еще одним перспективным методом управления реактивной мощностью является децентрализованное управление.

Децентрализованное (распределенное) управление предполагает создание самоорганизующейся системы интеллектуальных элементов, выработку алгоритма их коллективного поведения, декомпозицию и распределение задач, синтеза решений, правил согласования и координации их действий, описание внутренних состояний [3].

В процессе работы разработан алгоритм децентрализованного управления уровнем напряжения и потоками реактивной мощности.

Автоматизированное распределенное управление позволило снизить потери электроэнергии за сутки на 2,74 %, по сравнению с классическим способом регулирования напряжения.

Литература

1. **Крумм Л.А.** Методы приведенного градиента при управлении энергетическими системами. М.: Наука, 1977.

2. **Гвоздев Д.Б., Шведин Б.Я.** Разработка системы передачи информации о состоянии энергетических объектов // Электрические станции. 2013. № 8.

3. **Тарасов В.Б.** Многоагентные системы. М.: Эдиториал УРСС, 2002.

А.Э. Малышев, студ.; рук. И.С. Пономаренко, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ УСТАНОВКИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В последнее время все более широкое распространение получает такое понятие, как «распределенная генерация».

При реализации данной концепции появляется достаточно большое количество различных технологий, направленных на выработку электроэнергии именно на объектах «малой энергетики». Перспективной разработкой является использование вторичных энергоресурсов как источника для производства электроэнергии.

Малая мощность используемого оборудования вносит свои коррективы в условия его нормального функционирования. Пуск асинхронных двигателей, являющийся вполне нормальным с точки зрения эксплуатации режимом, может привести к нарушению устойчивости синхронных и развозбуждению асинхронных генераторов [1].

Проблема с автономными установками малой генерации может быть решена при помощи регулирования возбуждения генераторов, однако малая мощность вносит свои требования к такой системе [2]. Рассматриваются два варианта регулирования: регулятор напряжения асинхронного генератора на основе встречно-параллельно включенных тиристоров и регулятор, использующий ступенчатое подключение батарей конденсаторов.

Экспериментально было доказано, что схема, основанная на встречно-параллельно включенных тиристорах, не оправдала ожиданий, так как при активно-индуктивных и динамических нагрузках происходит постоянная (каждый период) коммутация тиристоров, которая влечет за собой появление гармоник и соответственно пульсирующей мощности, в то время как регулятор, использующий ступенчатое подключение батарей конденсаторов показал свою работоспособность во всех режимах, к тому же работа генерирующего оборудования и системы управления для случая сложной конфигурации сети не вызвала нареканий. Следовательно, в дальнейшем рекомендуется использовать именно этот тип регулятора.

Литература

1. **Торопцев Н.Д.** Асинхронные генераторы автономных систем. М.: Знак, 1998.

2. **Вишневский Л.В., Пасс А.Е.** Системы управления асинхронными генераторными комплексами. К.; Одесса: Лыбидь, 1990.

И.В. Миналиев, студ.; рук. Ю.В. Писковацкий, доц. (КГЭУ, г. Казань)

ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Потребность в электроэнергии в настоящее время растет большими темпами, возрастают и трудности, с которыми сталкиваются компании-поставщики электроэнергии при создании энергетических сетей. Для обеспечения электроэнергией в должном объеме, очевидным образом требуется контролировать пропускную способность воздушных линий электропередачи, что можно добиться мониторингом их температур.

Система контроля температуры провода позволяет контролировать отдельные критические участки ЛЭП в режиме реального времени. Эта не требующая больших финансовых вложений система имеет массу преимуществ. Обеспечивая динамический анализ сетевой структуры, она повышает общую безопасность и надежность энергетической сети. Существует огромный потенциал экономии затрат: можно избежать простоев и нарушений энергоснабжения и значительно уменьшить потребность в новых линиях и усовершенствованиях по высоте воздушных ЛЭП.

Температурный сенсорный датчик представляет собой микросхему DS18B20 производства фирмы «Maxim». DS18B20 обменивается данными по 1-Wire шине и при этом может быть как единственным устройством на линии, так и работать в группе. Все процессы на шине управляются центральным микропроцессором[1]. Сами профили температур или получающиеся на их основе результаты/события передаются с помощью модема. Приемник, получающий данные с модема, подключается к персональному компьютеру через стандартные интерфейсы RS-232, RS-485 или USB.

В перспективе планируется применение данного устройства на учебном полигоне КГЭУ.

Эта система дает возможность точно прогнозировать нагрузки и предотвращать температурную усталость проводов, вызываемую многократно повторяющимися термическими нагрузками. Также обеспечиваются оптимальные контроль провисания проводов и высота линии, не требующие возведения дополнительных сооружений [2].

Литература

1. **Белов А.В.** Создаем устройства на микроконтроллерах. СПб.: Наука и техника, 2007. — 304 с.: ил.

2. **Журнал** «Электроэнергия. Передача и распределение». 2012, 2013.

М.А. Никончук, студ.; рук. И.А. Платонова, к.т.н., доц. («НИУ «МЭИ»)

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ СООРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 35 — 220 кВ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРАВИЛ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 7-го ИЗДАНИЯ

При проектировании районной электрической сети на этапе технико-экономического сопоставления конкурентоспособных вариантов схемы сети пользуются базовыми укрупненными показателями стоимости ее основных элементов. Применительно к ВЛ со стандартными сталеалюминиевыми проводами эти показатели зависят от номинального напряжения и количества цепей, материала и конструкции опор, числа проводов в фазе и их сечения, а также климатических условий района прохождения трассы. Такие показатели были детально проработаны в советские годы и приведены в справочнике [1]. На протяжении долгих лет они успешно использовались как в проектной деятельности, так и в учебно-образовательном процессе.

Однако с введением в действие в 2003 году новой 7-й редакции Правил устройства электроустановок (ПУЭ-7) [2], нацеленной на повышение надежности конструктивных элементов ВЛ, требования к учету климатических условий при их проектировании существенно изменились. Эти новые требования влияют на значения габаритных пролетов и приводят к изменению необходимого количества опор, фундаментов, изоляторов и арматуры. Как следствие, изменяются капиталовложения в большую часть элементов линии.

Основная цель данной работы заключается в сравнении различных вариантов сооружения ВЛ 35 — 220 кВ по натуральным количественным показателям и анализе их влияния на стоимость 1 км линии. При этом рассматриваются различные варианты ВЛ, отличающиеся не только номинальным напряжением, но и другими влияющими параметрами.

Для реализации поставленной цели была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать удельные механические нагрузки на провода с учетом требований ПУЭ-7, выявлять габаритные и определяющие по прочности провода условия, вычислять габаритный пролет. На основании результатов этих расчетов выполняется анализ различных вариантов сооружения ВЛ по натуральным количественным показателям и устанавливается степень их соответствия справочным данным, полученным в условиях действия предыдущих изданий ПУЭ.

Литература

1. **Рокотян С.С., Шапиро И.М.** Справочник по электротехническим установкам. М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. **Правила** устройства электроустановок. — 7-е изд. М.: ЭНАС, 2004.

М.А. Орлова, студ.; рук. Ю.В. Шаров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
науч. конс. В.Э. Воротницкий, д.т.н., проф. (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)

РАСЧЕТ ПРОГРЕССИВНЫХ НОРМ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ 35—750 кВ

В настоящее время в российской энергетике большое внимание уделяется вопросам энергоэффективности и энергосбережения. В частности, в электросетевом комплексе России ежегодно внедряются мероприятия по снижению технологического расхода электроэнергии. С этой точки зрения сокращение потребления на собственные нужды подстанций является одной из наиболее перспективных областей.

В вопросах энергосбережения важную роль играет нормирование расхода энергетических ресурсов. Установление объективных, экономически оправданных норм позволяет выявить направления потенциального снижения расхода электроэнергии, оценить резервы сокращения этого расхода и эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий [1].

Существующая на данный момент «Инструкция по нормированию расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций 35–500 кВ» учитывает только текущие нормы расхода электроэнергии, в то время как для наибольшей эффективности следует использовать прогрессивные нормы — нормы, отражающие результаты проведенных на подстанции мероприятий [2].

В докладе рассмотрены возможные направления снижения потребления электроэнергии на собственные нужды подстанций, определены пути перехода от текущих к прогрессивным нормам расхода при внедрении различных энергосберегающих технологий. Проведен расчет прогрессивных норм для характерных подстанций ОАО «ФСК ЕЭС» различных номинальных напряжений, мощностей и систем охлаждения установленных трансформаторов, региона сооружения и др. Также рассмотрены подстанции с реализованными «пилотными» проектами, например внедрения системы утилизации тепла силовых трансформаторов. Полученные результаты сопоставлены с фактическими данными по расходу электроэнергии и нормами, рассчитанными по действующей инструкции. На основании полученных данных сделаны выводы об эффективности внедрения мероприятий для подстанций с различной структурой расхода на собственные нужды.

Литература

1. **Инструкция** по нормированию расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций 35—500 кВ. М.: СПО Союзтехрнерго, 1981.

2. **Кудрин Б. И.** Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1995. — 416 с.

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

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время актуальна проблема выбора настроечных параметров систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов для обеспечения статической устойчивости и высокого качества переходных процессов электроэнергетической системы. Достоверное решение этой проблемы требует применения адекватных моделей систем возбуждения и автоматического регулирования генераторов. До настоящего времени модели систем возбуждения при анализе статической устойчивости ЭЭС учитывались в основном весьма упрощенно — в виде одного апериодического звена, что не отражает основных характеристик современных систем.

Целью данной работы является оценка влияния систем возбуждения и АРВ на статическую устойчивость ЭЭС при представлении современных систем возбуждения более детальными математическими моделями. Рассматривались следующие системы возбуждения: ионная, тиристорная, высокочастотная, диодная бесщеточная [1]. Было рассмотрено несколько модификаций тиристорной и ионной систем возбуждения, используемых с АРВ СД. Для исследования влияния бесщеточной системы возбуждения использовалась математическая модель, полученная экспериментально. Математическая модель высокочастотной системы возбуждения использовалась в полном и упрощенном виде [2].

Расчеты проводились частотными методами для системы «станция—шины», что позволило просто оценить влияние различных моделей систем возбуждения на параметры переходных процессов и устойчивость ЭЭС [3].

Было показано, что детальное представление систем возбуждения может оказать заметное влияние на результаты и должно учитываться при выборе настроек АРВ по условию статической устойчивости.

Литература

1. **Глебов И.А.** Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1979.

2. **Моделирование** на АВМ высокочастотных систем возбуждения синхронных генераторов / П.П. Безруких, Г.И. Бурухин, Ю.А. Морозова, А.И. Соловьев // Труды МЭИ. Вып. 162. 1972.

3. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.

А.А. Сапунова, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ В СЕТЯХ 110—750 кВ

В действующих «Методических указаниях по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1] указывается необходимость учета резонансных режимов на высших гармониках при эксплуатации электрических сетей [2]. При этом до сих пор, несмотря на актуальность исследований, а также опасность возникновения резонансных режимов, нет утвержденных методик прогнозирования их появления в энергосистемах.

Для оценки данных явлений выполнен ряд расчетов режимов работы участков энергосистемы, различного номинального напряжения на основной частоте и высших гармониках. Математическое моделирование участка энергосистемы показало, что основными параметрами, влияющими на возникновение и на величину амплитуды тока при резонансе, являются номинальное напряжение сети (чем выше $U_{ном}$, тем выше вероятность резонансных явлений на частоте, близкой к 150 Гц [3]), полное сопротивление трансформатора, а также параметры схемы замещения ЛЭП, зависящие от способа подвески проводов, их числа, сечения, распределенности параметров. Проанализировано влияние активного сопротивления на величину тока при резонансе на высших гармониках. Проведены теоретические расчеты реальных случаев возникновения резонансных режимов в энергосистеме, подтвердившие правильность полученных результатов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке дополнений и изменений в [1], предназначенных как для организаций, занимающихся эксплуатацией электрических сетей, так и для организаций, ведущих режим, с целью предотвращения нежелательных переключений, приводящих к опасным режимам в ЭЭС.

Литература

1. **РД 153-34.0-15.501—00**. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии. М.: Министерство энергетики РФ, 2002.

2. **ГОСТ 13109—97.** Качество электрической энергии. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

3. **Коверникова Л.И., Смирнов С.С.** Один из подходов к поиску резонансных режимов на высших гармониках // Электричество. 2005. № 10.

Д.Ф. Семченко, студ.; рук. Р.Р. Карымов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЛАВИНА НАПРЯЖЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

При анализе развития ряда крупных аварий в электроэнергетических системах (ЭЭС) многих стран было выявлено нарушение устойчивости по напряжению в результате дефицита реактивной мощности (РМ) (лавина напряжения). Примером таких аварий, в том числе, является авария в Московской энергосистеме в мае 2005 года [1].

В соответствии с нормативными документами РФ лавина напряжения является следствием нарушения статической устойчивости, и, следовательно, при оценке устойчивости системы по напряжению используются статические подходы. Результаты анализа указанных выше аварий явно демонстрируют, что лавина напряжения является следствием длительного переходного процесса (от нескольких минут до нескольких часов) и использование существующего подхода может привести к ошибочным результатам.

Кроме того, действующие в РФ методические указания по предотвращению снижения напряжения потенциально даже утяжеляют режим (например, использование РПН трансформаторов для повышения напряжения в узлах нагрузки приводит к еще большей загрузке генераторов по РМ и, как следствие, к более быстрому срабатыванию автоматики перегрузки по току ротора).

В рамках данной работы был проведен анализ существующих в других странах (США, странах Европы) подходах к решению проблемы предотвращения лавины напряжения [2]. Кроме того, были проведены исследования и рассмотрены следующие способы предотвращения лавины напряжения: увеличение времени задержки или автоматическая блокировка РПН при развитии аварии, установка резервных источников РМ, постепенная разгрузка перегруженных генераторов оперативным персоналом и отключение потребителей в условиях рыночной экономики.

Выполнен ряд расчетов на тест-схеме, которые подтвердили необходимость рассмотрения лавины напряжения как длительного переходного процесса и продемонстрировали эффективность предложенных способов предотвращения лавины напряжения по сравнению с приведенными в методических указаниях.

Полученные результаты можно использовать для оптимизации способов противоаварийного управления в условиях рыночной экономики.

Литература

1. **Коган Ф.Л.** О причинах развития известной аварии в Московской энергосистеме // Электричество. 2008. № 5. С. 69—72.

2. **Taylor C.W.** Power System Voltage Stability, McGraw Hill, EPRI Power System Engineering Series, 1994.

Е.Л. Сибрина, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПАКТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Воздушные линии электропередачи являются основным средством передачи и распределения электрической энергии вне территории крупных городов. В этой связи вполне естественным является постоянный интерес к их усовершенствованию (повышению пропускной способности линий электропередачи, улучшению их технико-экономических показателей, ограничению экологического влияния на окружающую среду).

Повышение пропускной способности ВЛ может быть достигнуто либо за счет повышения номинального напряжения, либо снижения ее волнового сопротивления. Использование расщепленных проводов и уменьшение расстояния между фазами до минимально допустимых по условиям грозовых и внутренних перенапряжений приводят к увеличению напряженности электрического поля на поверхности провода, и как следствие, к необходимости изменения конструкции фазы за счет увеличения радиуса расщепления и количества проводов [1]. В свою очередь, такое изменение конструкции фазы ведет к уменьшению волнового сопротивления линии.

Следовательно, применение ВЛ нетрадиционного (компактного) исполнения является перспективным средством электропередачи при оптимальном согласовании электрических и механических свойства ВЛ с ее безопасностью [2].

В настоящее время в России единственной успешно эксплуатируемой компактной линией электропередачи СВН является ВЛ 330 кВ Псковская ГРЭС — Новосокольники, введенная в эксплуатацию в 1993 г.

Таким образом, целью автора является исследование технических возможностей применения компактных воздушных линий напряжением 220/500 кВ и выявление достоинств и недостатков по сравнению с линиями традиционных конструкций. В ходе исследования были определены погонные параметры линий, рассчитаны основные рабочие режимы компактных ВЛ, проведен расчет напряженности электрического поля компактных линий и линий традиционных конструкций.

Литература

1. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

2. **Повышение** эффективности электросетевого строительства / А.А. Зевин, К.П. Крюков, А.И. Курносов и др. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

В.В. Сиренко, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В условиях возрастающих требований к качеству электроэнергии и снижению потерь в электрических сетях необходимо развитие систем регулирования напряжения и реактивной мощности [1]. Данное развитие должно основываться на широком применении автоматических систем управления, использующих принцип активной адаптации, когда в едином центре управления сетью непрерывно оцениваются результаты прогнозирования изменения нагрузки и корректируются настройки средств регулирования.

Расчетные эксперименты, выполненные на тестовой схеме сети, позволили построить зависимости мощности с потребляемой нагрузкой и уровней активных потерь мощности, от напряжения в центре питания. Полученные результаты показывают, что автоматическое регулирование напряжение с одновременной компенсацией реактивной мощности позволяет существенно повысить эффективность электросетевых компаний. В условиях современной экономики в любой момент времени электросетевые компании могут обеспечивать качество электроэнергии, отпускаемой конечным потребителям, выбирая при этом наиболее выгодный с точки зрения получения максимальной прибыли режим работы сети. На данную зависимость влияют такие параметры, как статическая характеристика мощности нагрузки по напряжению, уровни потерь активной мощности в сети, стоимость электроэнергии, отпускаемой потребителю (тарифное меню), и стоимость потерь электроэнергии.

Разработанный алгоритм управления средствами регулирования напряжения и реактивной мощности может быть внедрен в распределительных сетях на базе современных устройств АРНТ и АСКУЭ.

Литература

1. **Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г.** Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 354 с.

Е.В. Смыслова, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УЧЕТ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ВЫБОРЕ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Рост электропотребления приводит к созданию все более мощных энергообъединений, в связи с чем возникает необходимость передачи электроэнергии и сопровождающей ее реактивной мощности по электрическим сетям от источников до потребителей. Между тем передача реактивной мощности связана с рядом нежелательных явлений: ростом потерь мощности и энергии, снижением пропускной способности элементов сети и работой приемников электроэнергии при недопустимых отклонениях напряжения от номинального значения [1]. Улучшить технико-экономические показатели электрической сети возможно с помощью компенсации реактивной мощности, которая может осуществляться как потребителем, так и сетевой организацией [2].

На основе проведенного анализа технических характеристик и стоимости средств компенсации реактивной мощности самыми выгодными к установке в распределительных сетях являются батареи статических конденсаторов. При исследовании на тестовой схеме результаты показали, что данные устройства компенсации реактивной мощности окупаются примерно за восемь лет даже при времени наибольших потерь от 1000 ч/год (сельскохозяйственная деятельность), когда срок службы батарей статических конденсаторов составляет 15 лет.

Компенсация реактивной мощности для улучшения технико-экономических показателей работы электрической сети является актуальной задачей, с помощью результатов исследований можно оптимизировать выбор средств компенсации, мест их установки и мощности с целью получения максимальной прибыли, а также улучшить качество электрической энергии.

Литература

1. **Жежеленко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2009.

2. **Управление** качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

А.С. Тамбатамба, студ.; рук. Ю.В. Шаров, к.т.н., проф.;
конс. Е.Ю. Свешникова, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОЭС ЗАМБИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Объединенная энергетическая система республики Замбия, содержащая 8318 км ЛЭП напряжением 66 — 330 кВ, уже к 2009 году столкнувшаяся с проблемой превышения потребности в мощности над располагаемой мощностью электростанций, в настоящий момент испытывает серьезные трудности в обеспечении качества и надежности электроснабжения потребителей [1]. Так, в часы максимальных нагрузок часть потребителей ОЭС Замбии вынуждена терпеть плановые периодические перебои в электроснабжении. Однако даже в условиях ограничения части потребителей не удается решить всех режимных проблем в энергосистеме [2].

Рассмотрены режимы работы ОЭС Замбии в современных условиях и существующие проблемы и способы их решения. Для исследования отмеченных вопросов, а также с целью получения необходимых результатов исследования, была сформирована расчетная модель Объединенной электроэнергетической системы Замбии. Моделирование осуществлялось в программном комплексе RastrWin с использованием данных, полученных из ЗЭСКО, КЭК и других источников (данные по составу сетевого оборудования, нагрузке потребителей энергосистемы и генерации всех существующих электростанций).

В энергосистеме Замбии установленная мощность ЗЭСКО на начало 2013 года составляет около 1849 МВт [2]. Система передачи и распределения электроэнергии в настоящее время работает с периодической перегрузкой основного сетевого оборудования (срок службы которого уже сейчас зачастую лежит за гранью нормативного срока службы), имеется дефицит мощности в некоторых районах страны, что оказывает негативное воздействие на статическую устойчивость энергосистемы. Реконструкция и модернизация различных сегментов энергосистем необходимы для решения проблем, связанных с оценкой допустимых режимов ОЭС Замбии.

Литература

1. **The Zambian** Power System and Issues Confronting the ERB, Energy Regulation Board / Kapika J, 2004.

2. **Report** on Lusaka transmission and distribution rehabilitation project / Document of The World Bank, May 3, 2013.

А.А. Ткачев, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В отечественной и зарубежной литературе уделяется достаточно большое внимание исследованиям инженерно-технических, психологических, экономических и других аспектов повышения надежности персонала электрических сетей. Под надежностью здесь понимается способность персонала, осуществляющего функции оперативно-технологического управления объектами, своевременно и правильно принимать решения по оперативному управлению сетью, в том числе и при ликвидации аварий [1].

В настоящее время для оценки надежности персонала энергетических объектов предложен целый ряд различных методов, которые можно классифицировать по причинным связям, доминирующему критерию, схеме построения моделей. Каждый из методов обладает определенными достоинствами и недостатками. Также не существует универсального метода, учитывающего всевозможные факторы, влияющие на надежность работы человека-оператора, в число которых входит и анализ информационной нагрузки.

Исходя из этого, разработка комплексного метода является актуальной, позволяющего уменьшить избыточную информацию, поступающую к оперативному персоналу, и тем самым повысить надежность его работы.

В связи с этим за основу был взят метод оценки надежной работы персонала энергосистем, основанный на оценке информационной нагрузки [2]. В качестве рассматриваемого объекта была спроектирована электрическая сеть, состоящая из 15 ПС и двух электростанций. Для созданной системы управления данной сетью был определен объем информации, поступающей к диспетчеру от любого объекта управления или ведения.

Далее была выполнена оптимизация системы диспетчерского управления с точки зрения оптимальной информационной нагрузки на диспетчеров [3].

Выполненными расчетами подтверждено, что разработанный метод оптимизации информационной нагрузки позволяет использовать его для повышения надежности оперативного персонала электрических сетей.

Литература

1. **Дьяков А.Ф.** Надежная работа персонала в энергетике. М.: МЭИ, 1991.

2. **Гвоздев Д.Б.** Методика расчета объема информации, передаваемого от единичного элемента управления (ведения) к диспетчеру электрических сетей // Вестник МЭИ. 2012. № 6. С. 60—65.

3. **Гвоздев Д.Б.** Информационная оценка системы диспетчерского управления // Электрические станции. 2006. № 3. С. 47—51.

В.С. Тузикова, асп.; рук. Е. Тлусти, к.т.н., проф.
(Чешский технический университет, г. Прага)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Оптимальное управление нормальными режимами электроэнергетических систем состоит в том, чтобы обеспечить надежное снабжение потребителей электроэнергией требуемого качества при минимальных затратах. Одним из показателей эффективности эксплуатации электроэнергетических сетей является величина потерь электроэнергии. Поэтому при оптимизации потоков мощности в нормальном и послеаварийных режимах работы системы в качестве одного из основных критериев необходимо использовать минимум потерь активной мощности.

В настоящем исследовании проведены расчеты по определению оптимальных мест установки устройств СТАТКОМ и определению оптимального потокораспределения с целью минимизации потерь мощности в системе. На рис. 1 представлена расчетная тестовая схема сети.

Целевая функция оптимизации имеет вид

$$\min F = C_1(Q_C) + \sum_{k=0}^{N_C} C_2(P_{loss})_k \,, \qquad (1)$$

где $C_1(Q_C)$ — функция затрат на установку СТАТКОМ, $C_2(P_{loss})$ — функция затрат на возмещение потерь активной мощности; N_c — количество рассматриваемых режимов ($N_c = 7$).

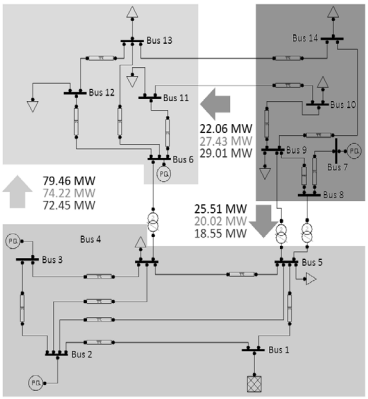


Рис. 1. Расчетная тестовая схема сети

Оптимизация проведена методом Particle Swarm Optimization (оптимизационным методом роя частиц).

В результате расчетов выявлены точки сети, где целесообразно применение СТАТКОМ с целью минимизации потерь мощности; проведены расчеты нормальных и послеаварийных режимов, в результате которых выявлены задачи управления режимом работы электрических сетей, решаемые применением СТАТКОМ для дальнейших исследований.

Литература

1. **FACTS:** Modeling and Simulation in Power Networks / E. Acha [и др.]. Hoboken: John Wiley & Sons, LTD, 2005. — 403 p.

Д.Г. Холодилин, студ.; рук. Д.В. Саленик, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПСЕВДООБРАЩЕНИЯ МАТРИЦ

Разработка методов и алгоритмов определения обобщенных параметров схем сети, обладающих *универсальностью* и *хорошей сходимостью* результатов при *плохой обусловленности* исходных матриц, а также их *коррекция* при изменениях в схеме является актуальной задачей.

Рассмотрен *новый метод нахождения матриц обобщенных параметров* с использованием метода *псевдообращения матриц*, описанный в [1]. Применяя *Е-алгоритм* [1], являющийся модификацией *алгоритма Гревилла* [2], по исходным первой матрице инцидентностей **M** и матрице сопротивлений ветвей $\mathbf{Z}_в$ одновременно находятся *матрица коэффициентов распределения напряжений* $-\mathbf{D} = (\mathbf{Z}_у\mathbf{M}\mathbf{Y}_в)$ и матрица произведений $(\mathbf{Z}_у\mathbf{M})$, численно равной $(\mathbf{Z}_в\mathbf{C})^T$. Учитывая равенство матриц $-\mathbf{D} = \mathbf{C}^T$, по матрице **D** легко определяется матрица **C**. Результатом произведения двух матриц – **D** и $(\mathbf{Z}_у\mathbf{M})^T$ является *матрица узловых сопротивлений* $\mathbf{Z}_у = -\mathbf{D}\times(\mathbf{Z}_у\mathbf{M})^T = \mathbf{C}^T\mathbf{Z}_в\mathbf{C}$. С помощью того же алгоритма по заданным второй матрице инцидентностей **N** и матрице $\mathbf{Z}_в$ находятся матрицы сомножителей $(\mathbf{Y}_к\mathbf{N})$ и $(\mathbf{Y}_к\mathbf{N}\mathbf{Z}_в)$, произведение которых дают *матрицу контурных проводимостей* $\mathbf{Y}_к = (\mathbf{Y}_к\mathbf{N}\mathbf{Z}_в)\times(\mathbf{Y}_к\mathbf{N})^T$. Матрицу *собственных и взаимных проводимостей ветвей* можно определить так: $\mathbf{Y}_{ij} = \mathbf{N}^T\times(\mathbf{Y}_к\mathbf{N})$ или $\mathbf{Y}_{ij} = \mathbf{Y}_в\mathbf{M}^T\mathbf{D} - \mathbf{Y}_в$.

Рассмотренный алгоритм применим и при нахождения *обратных матриц*, так, если исходная матрица квадратная, например $\mathbf{Y}_у$, то после применения *Е-алгоритма* результатом является матрица *узловых сопротивлений* $\mathbf{Z}_у$, аналогично для *проводимости контуров* $\mathbf{Y}_к = \mathbf{Z}_к^{+}$. В этом случае алгоритм работает как *метод обращения матриц*.

Для алгоритма была определена вычислительная сложность. Рассмотрена возможность совершенствования с целью учета *слабой заполненности матриц*, а также *коррекции матриц* при коммутациях в схеме сети.

Вышеизложенное указывает на перспективность использования *псевдообращения* в силу его *универсальности* при нахождении обобщенных параметров схем сети, которые используются при расчетах установившихся режимов, переходных процессов и гармоническом анализе электроэнергетических систем и систем электроснабжения.

Литература

1. **Егоров А.А.** Принцип структурной определенности при расчетах стационарных режимов электрических цепей // Электричество. 2005. № 4. С. 46—52.

2. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. — 5-е изд. М.: Физматлит, 2004. — 560 с.

С.С. Холопов, студ.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В настоящее время остро стоит вопрос рациональной организации деятельности диспетчерского персонала [1] по причине сложности схем сетей, трудности оперативного управления значительным количеством регулирующих средств, большого числа контролируемых параметров режима и сложности расчетов и оптимизации. Загруженность диспетчерского персонала [2], в том числе управляющего сетями 110—220 кВ, значительная часть функций которого в рамках управления режимом согласно ПТЭ прямо или косвенно затрагивает процесс управления компенсацией реактивной мощности (КРМ), делает актуальной задачу автоматизации и централизации управления КРМ.

Новизна проводимых исследований заключается в том, что практика внедрения систем управления КРМ по большей части ограничивается сетями сверхвысокого напряжения или групповым управлением возбуждением генераторов. Обзор литературы показал отсутствие практики внедрения подобных систем в сетях 110—220 кВ РФ.

В результате проделанной работы разработан алгоритм централизованного управления КРМ для тестовой сети 110—220 кВ. Результаты расчета показателя общей информационной насыщенности диспетчерских связей для сети с управляемой по алгоритму КРМ выявили снижение данного показателя (на 30–50 %), также уменьшилось количество отдаваемых диспетчером команд. Выявлено улучшение показателей качества (отклонение напряжения уменьшились на 5—10 %) при снижении диспетчерской загруженности.

Разрабатываемый алгоритм может использоваться в новых программно-технических комплексах на базе SCADA-систем, привнося в данные комплексы дополнительный функционал [3].

Литература

1. **Данилин А.В.** Основные направления работ по развитию автоматизированных систем диспетчерского управления в ОАО «СО ЕЭС»// Энергоэксперт. 2013. № 2.

2. **Гвоздев Д.Б.** Информационная оценка системы диспетчерского управления // Электрические станции. 2006. № 3.

3. **Егоров В., Кужеков С.** Интеллектуальные технологии в распределительном сетевом комплексе // Энергорынок. 2010. №.6.

А.А. Чупрунова, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И СЕТЕЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Одной из актуальных проблем Российской электроэнергетики является снижение потерь мощности и электроэнергии в единой энергетической системе. Потери энергии в сетях всех классов напряжения составляют около 13 % всей вырабатываемой электроэнергии (данные 2005 г.). При этом потери энергии в сетях 330—750 кВ составляют около 18 % суммарных потерь. Учитывая большие потоки мощности, передаваемые по этим сетям, в абсолютных значениях потери достаточно велики. Поэтому вопросам их уменьшения уделяется много внимания [1, 2].

Основными составляющими потерь для данной линии являются потери энергии на нагрев проводов и на корону. Потери мощности на нагрев, главным образом, зависят от значения передаваемой мощности по линии, а потери мощности на корону определяются видом погоды и распределением напряжения вдоль линии. При малых нагрузках сети и плохой погоде (туман, снег, изморозь) потери на корону могут быть соизмеримы и даже превышать потери активной мощности на нагрев проводов. Основным методом снижения потерь мощности является регулирование напряжения в концевых точках линии.

В работе рассматривается эффективность данного метода. Проведены расчеты для воздушных линий напряжением 220 — 750 кВ и для нескольких схем электропередачи с учетом ограничения по минимально и максимально допустимым напряжениям в концевых пунктах, и в промежуточных точках линии.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оптимизации по одной линии недостаточно для определения глобального минимума электропередачи.

Литература

1. **Рыжов Ю.П**. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

2. **СТО 56947007-29.180.02.140—2012.** Методические указания по проведению расчетов для выбора типа, параметров и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в ЕНЭС.

Г.Г. Чургулия, студ.; рук. С.В. Шульженко, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В последние годы повышению качества электроэнергии уделяют все больше внимания. Одним из основных вопросов, связанных с повышением качества электроэнергии в сетях, решаемых как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий выбор целесообразных источников, расчет и регулирование их мощности, размещение источников в системе электроснабжения [1]. Поэтому продолжает оставаться актуальной проблема оптимальной компенсации реактивной мощности.

Определение мощности и размещения КУ в распределительных сетях является сложной оптимизационной задачей, что обусловлено ее многомерностью, необходимостью учета ряда факторов, технических ограничений и режима работы сети.

Целью оптимизационной задачи является определение такой мощности БК, при которой суммарные затраты принимают наименьшее возможное значение. Для решения этой задачи в работе был предложен вычислительный алгоритм, который предполагается реализовать с помощью программы.

При этом целью расчета является распределение БК в электрической сети с точки зрения обеспечения минимума потерь ЭЭ в сети и минимизации приведенных затрат на компенсацию реактивной мощности, учитывающих стоимость БК и стоимость потерь ЭЭ в БК и сети.

Новизна результатов работы заключается в том, что создан инструмент, дающий возможность рассчитывать значения оптимальной компенсации реактивной мощности и места расстановки БК в распределительных сетях.

Данный алгоритм и программа могут быть использованы в научно-исследовательских работах, связанных с повышением качества электроэнергии и экономичности работы электроустановок.

Литература

1. **Железко Ю.С**. Выбор мероприятий по снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1989.

С.А. Шунаев, асп.; рук-ли В.П. Кавченков, д.т.н., проф., Р.В. Солопов, к.т.н., ст. преп. (Филиал МЭИ в г. Смоленске)

НЕКОТОРЫЙ ОПЫТ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ И РЕЖИМНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современные тенденции в расчете и анализе режимов электропередач требуют внедрения новых исследовательских программных комплексов. Возникает актуальная задача выбора наилучшего оптимизационного метода для построения на его основе программной логики всего комплекса.

Технико-экономическая оптимизация в настоящее время строится на отыскании экстремума функции одной или нескольких переменных. Широкое распространение получили методы математического анализа, математического программирования (линейные, нелинейные, динамические, статистические и т.д.), нейронные сети, теория игр [1].

Среди прочих особый интерес представляют методы критериального анализа и методы роевого интеллекта.

Суть критериального анализа заключается в использовании второй теоремы классической теории подобия и моделирования. При этом ряд недостатков (необходимость представления модели полиномом, условие каноничности, сложность учета дискретных и функциональных ограничений в виде равенств и неравенств и т.д.), ограничивавших применение данного метода, удалось исключить с разработкой на кафедре электроэнергетических систем Смоленского филиала МЭИ метода критериального программирования. В силу универсальности метод может дополняться или внедряться в различные программные структуры.

В данной работе предлагается интеграция метода роевого интеллекта (в частности, муравьиного алгоритма) с методом критериального программирования для создания логики программного комплекса по структурной и режимной оптимизации электроэнергетической системы.

Анализ показал, что в сравнении с точными методами комбинаторной оптимизации, такими как динамическое программирование и метод ветвей и границ, муравьиные алгоритмы имеют значительное преимущество. (неконвергентность, меньшее время работы и пр.)

Таким образом, применение интегрированного метода позволит эффективно решать задачи комплексной оптимизации электропередачи.

Литература

1. **Кавченков В.П., Солопов Р.В.** Алгоритм комплексной оптимизации режимов электроэнергетической системы с использованием обобщенных критериев подобия // Международный журнал «Программные продукты и системы». 2013. № 1. С. 101—104.

Секция 52

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент Г.В. Шведов
Секретарь секции — ассистент С.А. Акчурина

Конференция проводится при информационной поддержке РНК СИГРЭ (http://cigre.ru/)

И.Р. Абдулвелеев, асп.; рук. Г.П. Корнилов, д.т.н., проф.
(МГТУ им. Носова, г. Магнитогорск)

ПРОЧНОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Общая протяженность воздушных линий электропередачи (ВЛ) на территории Российской Федерации превышает 2,6 млн км. Значительная часть данных линий была введена в эксплуатацию в 1960—1970-х годах с расчетным сроком службы 30 лет, что говорит об их масштабном старении и износе на данный момент, подтверждаемым растущим увеличением отказов ВЛ за последние 10 лет. Сложившаяся ситуация требует реконструкции и замены значительной части ВЛ. При этом Стратегия развития Еди-

ной национальной электрической сети (ЕНЭС) предполагает строительство новых высоковольтных линий 220 кВ и распределительных сетей напряжением 6(10) кВ.

К вводимым в эксплуатацию и реконструируемым ВЛ предъявляются новые технические требования, предполагающие повышение сроков службы и надежности. Очевидно, что для достижения наиболее эффективного результата необходимо применение новейших технологий, включающих системы автоматизированного проектирования (САПР).

Прочностные исследования ВЛ 6(10)-380 кВ с применением САПР (Ansys, Femap, SolidWorks и др.) позволяют получить наиболее точные данные относительно деформации ВЛ при воздействии на них атмосферных нагрузок (ветра и гололеда) и учесть влияние температуры на прочностные характеристики элементов ВЛ (провода, арматуру и т.д.), а также разработать возможные варианты оптимизации.

В ходе прочностного исследования железобетонных и стальных многогранных опор ВЛ 6(10) кВ в среде SolidWorks модели опор испытывались на воздействие ветрового давления, соответствующего семи нормативным районам по ветру. На основании анализа полученных данных доказано, что стальные многогранные опоры являются более надежными и долговечными, чем железобетонные [1]. Таким образом, применение САПР позволяет осуществлять обоснованный выбор типа прокладываемых опор и, как следствие, существенно уменьшить число аварий и отказов на линиях и обеспечить необходимую надежность электроснабжения потребителей.

Литература

1. **Абдулвелеев И.Р.** Выбор типа опор воздушных линий электропередачи с использованием систем автоматизированного проектирования // Отраслевые аспекты технических наук. 2012. №5 (17). С. 37—41.

К.С. Аверьянова, студ.; рук-ли В.П. Степанов, д.т.н., проф., Н.В. Безменова, к.т.н., ст. преп. (СамГТУ, г. Самара)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЦЕХАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Одной из основных характеристик электромагнитной среды является напряженность магнитного поля промышленной частоты (МППЧ), величина которой не должна превосходить допустимые значения, регламентируемые СанПиН [1]. На стадии проектирования систем электроснабжения цехов промышленных предприятий результирующую оценку напряженности МППЧ в произвольно выбранной точке пространства цеха можно получить наложением известных индивидуальных «портретов» напряженности от совокупности технологических установок (ТУ), трансформаторных подстанций и промышленной электрической сети, а также осветительной электрической сети и осветительных установок.

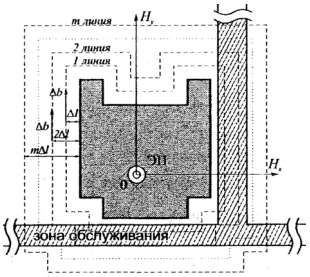


Рис. 1. Геометрический контур ТУ (желобошлифовальный станок) с равноудаленными линиями

Рассмотрим построение индивидуального «портрета» напряженностей МППЧ от ТУ с одним электроприемником (ЭП). Измерение напряженности МППЧ, как показано на рис. 1, проводится в горизонтальной плоскости по линиям, равноудаленным от геометрического контура ТУ. Для этого на планшет наносится m линий: первая линия на расстояние $\Delta 1$ от геометрического контура ТУ; m-я линия — $m\Delta 1$. Следующая плоскость проходит на уровне Δd от уровня «нулевой» отметки, последняя — на уровне $k\Delta d$. Измерения напряженности МППЧ проводятся в точках, разделенных шагом Δb, в трех направлениях: $\vec{H}_{xi}$, $\vec{H}_{yi}$, $\vec{H}_{zi}$. Модуль среднеквадратического значения вектора напряженности МППЧ в каждой точке измерения определяется по выражению

$$H_i = \sqrt{(\vec{H}_{xi})^2 + (\vec{H}_{yi})^2 + (\vec{H}_{zi})^2} \,. \qquad (1)$$

Литература

1. **СанПиН 2.2.4.723—98.** Переменные магнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях. М.: Минздрав России, 1999. — 20 с.

К.С. Аверьянова, студ., Н.К. Бурцев, асп.; рук. А.В. Гудков, к.т.н.
(СамГТУ, г. Самара)

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Расчет электрических нагрузок является одним из первых этапов проектирования систем электроснабжения (СЭС), от точности которого зависят капитальные затраты, металлоемкость СЭС и потери электроэнергии в ней. Ошибки в расчетах в сторону уменьшения электрических нагрузок вызывают повышение потерь электроэнергии, износ изоляции, и, как следствие, преждевременный выход из строя элементов электрических сетей. Завышение расчетных нагрузок связано с неоправданным увеличением капитальных затрат на электрооборудование и проводниковый материал. Точность расчета электрических нагрузок при проектировании СЭС зависит от многих факторов, одним из которых является учет фактических пределов изменения ординат графиков электрической нагрузки (ГЭН).

Авторами апробирована методика [1] определения пределов изменения ординат групповых ГЭН на стадии проектирования СЭС, использующая двухступенчатую индивидуальную модель работы электроприемников в режиме «включено»-«выключено» и теоремы «сложения» и «умножения» теории вероятностей. При этом из рассмотрения исключаются значения электрической нагрузки, имеющие малую вероятность, определяемую по принятым критериям оптимальности при сопоставлении возможного ущерба от потерь электроэнергии с экономией затрат на сеть.

Анализ полученных результатов показывает, что приведенные к среднеквадратическому отклонению (нормированные) пределы изменения ординат ГЭН для групп, содержащих от 6 до 10 электроприемников с различным сочетанием номинальных мощностей, коэффициентов использования и загрузки, находятся в диапазоне от 0,65 до 2,6, неучет которых на стадии проектирования СЭС, может приводить к погрешностям в оценке расчетных значений пиков и впадин нагрузки более чем на ±10 %.

Предложенная методика оценки пределов изменения ординат ГЭН является наиболее отвечающей фактическому закону распределения ординат ГЭН и позволяет избежать неоправданного увеличения капитальных затрат на сооружение систем электроснабжения.

Литература

1. **Гудков А.В.** Расчет электрических нагрузок на низших ступенях иерархии систем электроснабжения машиностроительных предприятий: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. — 20 с.

А.В. Валянский, асп.; рук. Ю.В. Шаров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Надежность и качество электроснабжения являются главными аспектами во взаимоотношениях между поставщиком и потребителем электрической энергии. Надежность электроснабжения имеет тесную связь с качеством электроэнергии, и наоборот.

В стандартах между качеством электроэнергии и надежностью электроснабжения норм и связей не установлено. В договоре электроснабжения предусматривается ответственность поставщика перед потребителем за нарушение стандарта [1]. Надежность же электроснабжения определена в [2] как бесперебойность поставки электроэнергии приемникам потребителя, подразделенным на три основные категории.

В то же время на практике известно, что при ухудшенных показателях качества электроэнергии в распределительной сети учащаются случаи отказа элементов системы электроснабжения (СЭС). Что, несомненно, повышает риск перерыва электроснабжения электроприемников.

Воздействие показателей качества электроэнергии на элементы СЭС может быть внезапным или постепенным. Внезапные события, такие как временные перенапряжения, импульсные напряжения (грозовые, коммутационные), определяют диэлектрические свойства применяемых изоляционных материалов и воздействуют на малых интервалах времени (от долей секунды до нескольких секунд). Постепенные отказы обусловлены тепловыми, физико-химическими, вибрационными процессами износа и старения, протекающими в активных частях электрооборудования. Эффект от наличия постепенных отказов проявляется на длительных периодах времени (месяцы, годы).

Авторами предлагается метод оценки надежности электроснабжения электроприемников потребителя с учетом постепенных отказов элементов СЭС, вызванных тепловым старением изоляции при наличии кондуктивных помех (несинусоидальные и несимметричные режимы передачи и распределения электроэнергии).

Литература

1. **ГОСТ 13109—97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2006.

2. **Правила** устройства электроустановок / Седьмое издание подготовлено ОАО «ВНИИЭ». Утверждено приказом Министерства энергетики России от 08.07.2002 № 204.

А.А. Васильев, студ.; рук. О.В. Дичина, к.т.н., доц., (НИУ «МЭИ»)

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО БЛОКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

При расчетах режимов и оценки состояния распределительных электрических сетей одной из проблем является отсутствие полной и достоверной информации о нагрузках потребителей. Нагрузки потребителей сетевой компании можно представить с разной степенью достоверности. Наиболее точным представлением нагрузки являются данные АИИС КУЭ. Если у потребителей установлены счетчики, сохраняющие суточные графики нагрузки, то, имея эти данные и алгоритмы статистической обработки, можно достаточно точно выполнить расчет режима сети и оценку ее состояния за сутки. Для потребителей с максимальной мощностью более 670 кВт по [1] необходима установка счетчиков с почасовым учетом.

У многих потребителей установлены приборы учета, определяющие только суммарное количество электроэнергии, поэтому для оперативных расчетов режима, кроме среднего значения электроэнергии за сутки (или месяц), необходимы типовые графики нагрузки потребителя в соответствии с характером его потребления. Для потребителей, которые не объединены в АИИС КУЭ, данные о потреблении не поступают в расчетно-информационные системы с определенной периодичностью. И наименее достоверным будет способ определения нагрузки по измерениям в дни контрольных замеров. В этом случае также необходим типовой суточный график в соответствии с характером потребления. Если никакой информацией об измерениях нагрузки потребителя сетевая компания не располагает, то тогда принимается нагрузка, равная максимальной мощности из документов технологического присоединения.

Дополнение программного комплекса «ЭРИС-ПО» модулем определения нагрузок с разной степенью достоверности позволит более точно рассчитывать режимы сетей и оценивать их состояние. Кроме того, имея сведения о максимальной мощности всех потребителей из документов на присоединение, сетевой компании легко реализовать в соответствии с [1] мониторинг величины резервируемой максимальной мощности, которая определяется как «разность между максимальной мощностью энергопринимающих устройств потребителя и мощностью, использованной в соответствующем расчетном периоде» [1].

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 04 мая 2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии».

А.А. Горбунов, К.С. Аверьянова, студенты; рук. А.В. Гудков, к.т.н.
(СамГТУ, г. Самара)

РАСЧЕТ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ИСКАЖЕНИИ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Помимо нормативных потерь, наличие которых в системах электроснабжения (СЭС) и электроприемниках (ЭП) неизбежно, существуют также сверхнормативные потери, связанные с хищениями электроэнергии, несовершенством приборов учета или их отсутствием, неоптимальными режимами работы СЭС, присутствием электромагнитных помех в СЭС, фиксируемых в виде показателей качества электроэнергии. Сверхнормативные потери электроэнергии — это прямые финансовые убытки промышленных и коммунальных предприятий и электроснабжающих организаций.

Авторами проведены исследования крупного офисно-делового центра г. Самара на предмет наличия в СЭС высших гармоник (ВГ) тока и напряжения и связанных с ними сверхнормативных потерь электроэнергии в ЭП и электрооборудовании. Объект отличается наличием мощных систем кондиционирования, холодильного оборудования, большого компьютерного парка, люминесцентного освещения, которые являются источниками ВГ в СЭС, и мощных асинхронных электроприводов насосов, вентиляторов, лифтов и т.д., реагирующих на несинусоидальность питающего напряжения возникновением дополнительных потерь электроэнергии.

Анализ результатов замеров показал, что наибольшие искажения создают ВГ третьего порядка, что сопровождается протеканием в нулевом проводнике токов третьей гармоники, превышающих в ряде случаев амплитуды токов в фазе. Подобные искажения приводят к искажению синусоидальности токов и напряжений на вводах силовых трансформаторов.

По формулам, приведенным в [1], и результатам экспериментальных исследований ВГ в СЭС были рассчитаны добавочные потери в асинхронных двигателях и кабельных линиях 15-этажного офисно-делового центра г. Самара, а также в силовых трансформаторах собственной понизительной подстанции 10/0,4 кВ.

Результаты расчетов показали, что суммарные потери в СЭС и ЭП исследованного офисно-делового центра только за счет протекания токов ВГ составляют более 1 % общего электропотребления, что соответствует в настоящий момент 72 тысячам рублей в год.

Литература

1. **Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.** Качество электроэнергии на промышленном предприятии. М.: Энергоатомиздат, 2005.

А.А. Горбунов, студ.; рук. О.В. Дичина, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО МИКРОРАЙОНА ГОРОДА

При проектировании системы электроснабжения жилого района города возникает задача выбора числа подстанций, их номинальной мощности, расположения, распределения нагрузок между подстанциями, сечений и трасс кабельных линий с целью минимизации дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию сети. Вследствие большого количества оптимизируемых параметров и негладкой функции затрат данная оптимизационная задача сложна для решения классическими методами. Одним из методов, разработанных для решения данного класса задач, являются генетические алгоритмы.

Генетические алгоритмы — упрощенные версии процессов и механизмов эволюции, применяемые с целью построения адаптивных систем. Эволюционные алгоритмы приобретают свойства адаптивности через итеративный процесс накопления и усиления полезных вариаций методом проб и ошибок [1].

Личный вклад автора заключается в разработке программы, реализующей решение данной задачи с использованием генетического алгоритма. Составными частями программы являются: географическая информационная система (ГИС), используемая для работы с картой района, реализация генетического алгоритма, реализация алгоритмов поиска по шаблону и поиска на графах, вспомогательные структуры для хранения данных.

Входными данными программы являются: параметры нагрузок и их расположение на карте района, удельная стоимость сооружения элементов сети, стоимость возмещения потерь электроэнергии. Целевая функция — дисконтированные затраты на сооружение и эксплуатацию сети. Ген — двоичная последовательность, в которой закодированы оптимизируемые параметры сети — число подстанций, их номинальная мощность, граф сети.

В результате работы генетического алгоритма выбираются несколько оптимальных по затратам графов сети. Расположение подстанций для оптимальных графов сети определяется с помощью алгоритма поиска по шаблону с целевой функцией затрат на прокладку кабелей. Трассы кабелей определяются по карте района с использованием алгоритмов поиска на графах. Результатом работы программы является оптимальная по дисконтированным затратам конфигурация СЭС жилого района города.

Литература

1. **Jason Brownlee**. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes. — First Edition, Lulu Enterprises, January 2011. ISBN: 978-1-4467-8506-5.

С.В. Грамма, асп.; рук. Г.В. Шведов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В последние три десятилетия постоянно растет актуальность вопросов энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Вопрос энергоэффективности в системе транспорта электрической энергии имеет особое значение в связи с тем, что энергоресурс, необходимый для работы системы, является и транспортируемый ресурсом.

Повышение энергетической эффективности — это медленный поступательный процесс, в основе которого лежит смена одних технологий другими. Поэтому важно всегда иметь возможность оценить, когда выгода от применения новых технологий превысит затраты на их внедрение. Таким образом, важно уметь на перспективу оценить энергоэффективность системы, а в данном случае — электрической сети. Повышению энергетической эффективности должна предшествовать разработка средств и методов оценки энергетической эффективности.

Несмотря на значительную историю вопроса [1] и наличие нормативно-правовых актов [2, 3] методик определения энергоэффективности для электрических сетей или их частей не существует. Очевидно, что методика определения энергоэффективности для электрической сети должна опираться на измеряемые данные.

В докладе рассмотрена предлагаемая методика определения энергоэффективности и предложены некоторые дополнительные критерии для оценки отдельных аспектов энергоэффективности электрической сети. На примере идеализированной математической модели электрической сети приводится расчет показателей энергоэффективности. По результатам серии расчетов, учитывающих развитие электрической сети, строится регрессионная модель оценки показателей энергоэффективности электрической сети и проводится определение их перспективных значений.

Литература

1. **Фокин Ю.А.** Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: В 5 кн. / под ред. В.А. Веникова. Кн. 3. Надежность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высшая школа, 1989.

2. **ГОСТ Р 51387—99.** Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения.

3. **Федеральный Закон** № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

В.М. Ермошина, студ.; рук. Т.Б. Лещинская, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МАЛОЙ ПЛОТНОСТЬЮ НАГРУЗОК В НЕЧЕТКИХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ

Значительная часть полезного отпуска электроэнергии в энергосистемах РФ относится к сельским районам (районам с малой плотностью нагрузок). Структура и параметры сельских электрических сетей обусловливают высокий уровень технических потерь электроэнергии в них.

В настоящее время износ основных фондов сельских распределительных сетей РФ достигает более 70 % [1]. В связи с этим наиболее актуальными являются мероприятия по снижению потерь электроэнергии, связанные с реконструкцией сетей, в частности замена трансформаторов с учетом их загрузки и замена проводов ВЛ 10 кВ. В качестве мероприятия целесообразно рассмотреть также установку конденсаторных батарей.

Действующая инструкция предполагает выбор мероприятий по единственному критерию экономической эффективности [2]. В работе для оценки эффективности вариантов предложены три критерия: дисконтированные затраты $З_д$, потери электроэнергии ΔW, неодинаковость напряжения H [3].

Значения частных критериев зависят от рассматриваемых мероприятий (стратегий) и состояния среды. Для характеристики среды в данной работе предлагается использовать два параметра: электрическую нагрузку и стоимость потерь электроэнергии. Динамика каждой из этих величин в течение расчетного периода рассматривается как неопределенный фактор среды.

В работе проводится имитационное моделирование системы электроснабжения. Выбор лучшей стратегии осуществляется на основе аппарата теории нечетких множеств с использованием данных экспертного опроса.

Применение разработанной методики выбора мероприятий по снижению потерь электроэнергии в сетевых компаниях позволит оптимизировать затраты на реконструкцию сельских распределительных сетей.

Литература

1. **Князев В.В., Лещинская Т.Б.** Многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. — 100 с.: ил..

2. **Инструкция** по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений И34-70-030–87. РД 34.09.208. М.: СПО «Союзтехэнерго», 1987.

3. **Левин М.С., Лещинская Т.Б.** Методы теории решений в задачах оптимизации систем электроснабжения: учебное пособие / под ред. И.А. Будзко. М.: ВИПКэнерго, 1989. — 130 с.: ил.

П.К. Милованов, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ЕМКОСТНОЙ ОТБОР МОЩНОСТИ В ИНТЕРЕСАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ НЕЭНЕРГОЕМКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Работа посвящена одной из перспективных форм «малой» энергетики — емкостному отбору мощности от линий электропередачи. Данный способ электрификации удаленных неэнергоемких потребителей обладает в ряде случаев преимуществами перед другими формами электроснабжения [2]. Несмотря на все больше возрастающий интерес, проявляемый к вопросам емкостного отбора, в настоящее время не проводилось масштабных исследований этого вопроса. Сложившаяся ситуация, усугубляемая ограниченностью необходимой технической литературы, не может удовлетворить запросы эксплуатационных служб энергосетей, а также потребителей, нуждающихся в электроснабжении при помощи емкостного отбора.

Новизной в изучении вопроса емкостного отбора мощности является обоснование возможных актуальных на данный момент потребителей, в интересах которых необходимо осуществить емкостной отбор, анализ современной энергосистемы и разработка предложений по электроснабжению таких потребителей с помощью устройства емкостного отбора.

На данном этапе работы выполнены: разработка устройства емкостного отбора мощности и его унификация при возможности использования для отбора мощности от линий различных классов напряжений 35—220 кВ; разработка методики, позволяющей определить необходимые параметры устройства емкостного отбора [1] в зависимости от класса напряжения линий, от которой проводится отбор мощности, конструкции и типа опор [3].

В перспективе исследования — изучение массового применения емкостного отбора мощности как способа электроснабжения удаленных неэнергоемких потребителей, основанного на анализе сегодняшних реалий, запросов и возможностей энергосистемы.

Литература

1. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. — 9-е изд., перераб. и доп. М.: Гардарики, 2001. — 317 с.

2. **Булашевич Д.Н. Юренков В.Д.** Емкостной отбор мощности от линий электропередачи. М.: Госэнергоиздат. 1959. — 135 с.

3. **Серия 3.407.2—156.** Унифицированные конструкции промежуточных и анкерно-угловых стальных опор ВЛ 110—330 кВ. Энергосетьпроект, 1988.

Д.В. Николаев, студ.; рук. О.В. Дичина, к.т.н., доц., (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЧЕТ И ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ ПОДСТАНЦИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Проведение плановых ремонтов оборудования подстанций является необходимой составляющей деятельности любой электросетевой компании. От правильности планирования и качества проведенных ремонтов зависит надежность электроснабжения потребителей. Для районов электрических сетей, обслуживающих трансформаторные подстанции (ТП) с напряжением 6—10—20/0,4 кВ, количество ремонтов составляет 10—15 в год на 100 подстанций, а общее количество обслуживаемых подстанций в разных распределительных сетевых компаниях (РСК) составляет от 100 до 1000.

На основе метода объектно-ориентированного проектирования проведен анализ бизнес-процессов планирования, выполнения ремонтов и составления отчетности. Разработаны информационная модель, алгоритмы технологических последовательностей выполнения работ с учетом взаимодействия производственных служб, интерфейс программных блоков с разбивкой по автоматизированным рабочим местам РСК.

В автоматизированной информационной системе реализованы алгоритмы проведения капитальных, аварийных и текущих ремонтов. Для плановых ремонтов рассмотрено две стратегии проведения ремонтов: регламентная в соответствии со сроками ремонтов (раз в 5–8 лет) и по техническому состоянию при недостаточности ресурсов (персонала, финансирования). При стратегии ремонтов по техническому состоянию план ремонтов корректируется в соответствии с материальными ресурсами и трудозатратами. В план ремонтов включаются подстанции с наибольшим сроком службы, большим количеством обнаруженных дефектов и проведенных аварийных ремонтов.

Текущие ремонты проводят при обнаружении дефектов. После осмотра подстанций все дефекты заносятся в журнал дефектов, который анализируется главным инженером электросети, указываются сроки устранения дефектов, ответственные лица за проведение текущего ремонта, далее подается заявка на отключение оборудования в диспетчерскую службу. После проведения всех видов ремонтов выполняются испытания, ставится оценка качества, рассчитываются трудозатраты, составляются отчеты.

Внедрение программ информационной системы позволит персоналу служб электросети получить быстрый доступ к данным подстанций, их ремонтам, испытаниям, выполненным работам, анализам дефектов и повреждений оборудования и различной отчетной документации.

О.И. Пономаренко, студ.; рук. О.В. Дичина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАСЧЕТА РЕЖИМА СЕТИ 6–10–20/0,4 КВ

В связи с развитием информационных технологий, методов связи и передачи информации на текущий момент в электроэнергетике происходит масштабное внедрение принципиально нового для сетей оборудования. Развитие информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) в сетях 6—10—20/0,4 кВ приводит к возможности получать данные не только о потреблении электроэнергии, но и о нагрузках с дискретностью от 1 ч и менее, что позволяет рассчитывать режимы сети для каждого часа в году и принимать более обоснованные решения диспетчерского управления.

К настоящему времени разработано большое количество методов и алгоритмов расчетов режимов сети применительно к различным классам напряжения, например алгоритмы Гаусса—Зейделя, Ньютона—Рафсона и матричные разновидности таких алгоритмов. Разомкнутый режим работы сетей 6–10–20/0,4 кВ, когда в любой момент времени работающая сеть может быть представлена своим деревом, без наличия в ней замкнутых контуров, позволяет реализовать наиболее простые алгоритмы, например «в два этапа». С учетом топологии сети на первом этапе рассчитываются мощности в ветвях сети, на втором — напряжения узлов, что недостаточно эффективно для многократных расчетов на неизменной схеме.

Для ускорения расчетов режимов по суточным графикам нагрузки на основе измерений в АИИС КУЭ, был разработан специальный алгоритм «быстрого» расчета режима разомкнутой сети, основанный на использовании линейного оператора, работающего с множествами узлов и ветвей. Топологический анализ сети проводится один раз в начале расчета, и определяется линейный оператор связи в виде слабозаполненной матрицы [1] между током нагрузки каждой ветви и нагрузками (задающими токами) узлов, влияющих на эту ветвь. На каждом шаге вычислений нет необходимости проведения топологического анализа, поэтому необходимые параметры режима анализируемой сети получаются практически мгновенно. Описанный алгоритм был программно реализован и апробирован.

Применение данного метода расчета позволяет успешно решать задачи оперативного диспетчерского управления, задачи контроля, учета и мониторинга качества электроэнергии и другие.

Литература

1. **Брамеллер А., Аллан Р., Хэмэм Я.** Слабозаполненные матрицы. Анализ электроэнергетических систем: пер. с англ. М.: Энергия, 1979. — 192 с.: ил.

В.С. Романов, асп.; рук. В.Г. Гольдштейн, д.т.н., проф.
(СамГТУ, г. Самара)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ МЕГАПОЛИСОВ

Энергоснабжение как одна из основных составляющих жизнеобеспечения и всех сторон жизнедеятельности должно соответствовать самым высоким требованиям по его качеству и надежности. Особенно важной с этой точки зрения представляется организация качественного и безаварийного электроснабжения в современных крупных городах — мегаполисах (МП), в которых количество жителей превышает один миллион и достигает двадцати и более [1]. Качественное и безаварийное электроснабжение МП требует решения многочисленных энергетических, экономических, социальных и градостроительных задач [2].

В настоящее время в энергообеспечении мегаполисов существует ряд кардинальных проблем. Среди них можно выделить следующие:

а) нехватка генерирующих мощностей;

б) нехватка распределительных сетей на уровне 110–220 кВ, чтобы довести эти мощности до конкретных районов мегаполиса;

в) ненадежность электроснабжения потребителей на уровне распределительных сетей 6(10) и 0,4 кВ;

г) неустойчивость работы всех трех направлений — генерации, передачи, распределения;

д) отсутствие эффективной консолидации этих направлений между собой и с электропотреблением;

е) формирование тарифов и т.д.

В представленном докладе проведен обзор и анализ крупнейших МП мира и России, представлены проблемы их электроснабжения и предложены пути их решения. Тема исследования особо актуальна в настоящее время, поскольку с предстоящими проблемами отечественных мегаполисов мировое сообщество уже сталкивалось, и наша задача сегодня заключается в разработке совершенной для наших условий системы электроснабжения МП, основанной на мировом опыте и инновационных достижениях в области науки, используя инновационные типы электрооборудования и методы управления режимами крупных энергообъединений.

Литература

1. **New York City Energy Policy** Task Force, New York City Energy Policy: An Electricity Resource Roadmap. January 2004.

2. **International Energy Agency**, World Energy Report. 2004.

К.С. Савельева, студ.; рук. Е.А. Панова, к.т.н.
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЭП

Системы промышленного электроснабжения (СЭС) являются сложными объектами, представляющими собой сети напряжением 0,4-500 кВ, собственные и внешние источники электроэнергии, сложнозамкнутые сети напряжением 110—220 кВ со сравнительно короткими воздушными (ВЛ) и кабельными (КЛ) линиями, преобладающие над замкнутыми разомкнутые сети напряжением 35 кВ и ниже. Все вышеперечисленное затрудняет использование существующих программных продуктов расчета и анализа режимов электроэнергетических систем в условиях таких объектов.

Одними из наиболее распространенных повреждений в СЭС являются обрывы проводов ЛЭП, приводящие к возникновению неполнофазных и сложнонесимметричных режимов, сочетающих обрыв фазы и замыкание ее на землю, не ликвидируемых релейной защитой и, как следствие, существующих длительное время. Кроме того, возможны несимметричные режимы при пофазных ремонтах электрооборудования подстанций связи СЭС с энергосистемой. При расчете параметров таких режимов актуальной является задача учета электромагнитного и электростатического влияния проводящих элементов ВЛ и КЛ напряжением 35 кВ и выше.

На кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработан программно-вычислительный комплекс (ПВК) КАТРАН, одной из возможностей которого является расчет аварийных и ремонтных несимметричных режимов произвольного вида. Алгоритмы расчета несимметричных режимов в ПВК КАТРАН основаны на сочетании методов последовательного эквивалентирования и симметричных составляющих. Автором разработаны математические модели ВЛ и КЛ, позволяющие учесть взаимоиндукцию фазных проводников и заземленных элементов ЛЭП одной цепи (грозотросы ВЛ, экраны и изоляция КЛ), а также соседних цепей ЛЭП, собственные и взаимные емкости проводников ЛЭП, наличие и шаг транспозиции. Разработанные математические модели реализованы в ПВК КАТРАН, с использованием которого выполнена серия расчетов в условиях Магнитогорского энергетического узла.

Разработанные математические модели и ПВК, а также результаты расчета и анализа несимметричных режимов могут быть использованы при работе специалистов группы режимов электротехнических лабораторий промышленных предприятий.

В.В. Самойлов, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ И ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ОТ ОСНОВНОЙ СЕТИ

В настоящее время сложилась практика, согласно которой выбор резервного источника электроснабжения (РИЭ) осуществляется в основном по мощности потребителя. Но при длительных отключениях и при отсутствии возможности восстановить электроснабжение в приемлемые сроки объекты, нормальное функционирование которых критично, оказываются обесточены. Для исключения подобной ситуации в данной работе предложено осуществлять выбор РИЭ по мощности и времени предполагаемой автономной работы.

Целью работы является разработка методики обоснования выбора РИЭ в зависимости от потребляемой мощности и от времени автономной работы.

Выбор состава системы резервного электроснабжения осуществляется по экономическому критерию и состоит из нескольких этапов: для каждого потребителя формируются схемы электроснабжения с применением различных РИЭ; проводится расчет основных показателей надежности ЭЭС и выбор схемы, обеспечивающей требуемую надежность; строятся графические зависимости капиталовложений от времени автономной работы; проводится анализ графических зависимостей и выбор варианта состава системы резервного электроснабжения.

Предварительные расчеты позволяют сделать следующие выводы. Стоимость системы с РИЭ на основе аккумуляторных батарей имеет наименьшее начальное значение, но с увеличением времени автономной работы оно растет наиболее интенсивно. Таким образом, при относительно небольших перерывах в электроснабжении для маломощных потребителей целесообразно применять ИБП с аккумуляторными батареями. Вариант с фотоэлементами с увеличением времени автономной работы не дорожает, но изначально имеет наибольшую стоимость. При длительных перерывах в электроснабжении целесообразно применять бензиновые и дизельные электроагрегаты. При малой мощности и очень длительных отключениях целесообразна система электроснабжения на основе фотоэлементов. При этом по экономическим соображениям стационарную сеть используют как резервный источник.

Результатом работы является методика обоснования выбора РИЭ в зависимости от потребляемой мощности и времени автономной работы. Использование методики при проектировании схемы электроснабжения позволит увеличить надежность электроснабжения за счет введения дополнительного требования по времени автономной работы.

М.А. Силаев, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОЦЕНКЕ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Опыт контроля качества электроэнергии (КЭ) в сетях всех классов напряжений свидетельствует о том, что уровень несимметрии регулярно превышает нормативные значения. Анализ последствий влияния несимметрии напряжений на работу двигательной нагрузки выявил, что необходимо расширить традиционные подходы к оценке данного показателя КЭ. Связано это с тем, что действующие интервалы усреднения несимметрии в 3 с по [1] и в 10 мин по [2] не позволяют регистрировать быстроизменяющиеся помехи, оказывающие влияние на работу электродвигателей (ЭД).

Так, например, оценка мгновенных значений напряжения обратной последовательности, создаваемого тяговой подстанцией, показала, что амплитуда коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности за 3 с может неоднократно в несколько раз превышать предельно допустимую величину в 4 %, при этом его усредненное на том же интервале значение будет находиться в пределах нормы. Кроме того, помимо быстроизменяющейся амплитуды несимметрия, обусловленная работой железнодорожного транспорта, характеризуется переменным углом между симметричными составляющими напряжения, изменяющимся от 0° до 145°, т.е. является перемежающейся [3]. Несимметрия такого рода оказывает опасное влияние на работу асинхронной нагрузки, в частности приводит к недопустимым уровням вибраций и, как следствие, к отключениям двигателей.

Таким образом, существует необходимость в дополнении существующих методик оценки КЭ алгоритмами, позволяющими фиксировать мгновенные значения несимметрии напряжения по обратной последовательности с учетом углового сдвига между симметричными составляющими для обеспечения возможности анализа влияния вышеописанных помех на ЭД и разработки способов защиты от них.

Литература

1. **ГОСТ 13109—97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. **ГОСТ Р 54149—2010.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

3. **Церазов А.Л.** Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Дис. ... канд. техн. наук. М., 1962. — 182 с.

Е.В. Ткаченко, студ.; рук. Е.А. Конюхова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОЙ ПОНИЗИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ЭТАПЕ ТЭО СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Вопрос выбора местоположения главной понизительной подстанции (ГПП) при построении системы электроснабжения промышленного предприятия (СЭСПП) актуален [1]. При выполнении проекта размещение ГПП целесообразно: 1) в геометрическом центре территории; 2) в середине ближайшей к центру границы. При размещении ГПП на границе длина кабельных линий с номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 10$ кВ увеличивается. Затраты для первого случая складываются из затрат на высоковольтный (35–110 кВ) кабельный ввод от границы до местоположения ГПП $З_{\text{ввод}}$ и затрат на кабельные линии 10 кВ $З_{1к}$. Для второго случая имеют место затраты только на кабельные линии 10 кВ $З_{2к}$.

Целью данной работы является определение значения расчетной активной нагрузки ПП на низком напряжении $P_{\text{н}}$, при которой имеет место равенство затрат: $З_{\text{ввод}} + З_{1к} = З_{2к}$ или $З_{\text{ввод}} = З_{2к} — З_{1к}$. (1)

Средняя длина участка линии 10 кВ между присоединениями трансформаторов 10/0,4кВ [1] при их числе

$$N_{\text{т.л}}: L_{\text{уч}} = \lambda \sqrt{F_{\text{п.п}}} \,/\, \sqrt{N_{\text{т.л}}} \,. \qquad (2)$$

После подстановок и преобразований (1) представляется как

$$з_{\text{ввод}}\lambda_1 = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{н}} \sqrt{N_{\text{т.л}}}} \times$$

$$\times \left(\frac{з_{кF} N_{\text{т.л}}}{j_{\text{эк}}} + \frac{з_{\text{к.п}}}{K_{\text{з.т}} I_{\text{ном.т}}} + c_{\text{э}} j_{\text{эк}} \tau \rho \frac{(N_{\text{т.л}} + 1)(2N_{\text{т.л}} + 1)}{2N_{\text{т.л}}} \right), \qquad (3)$$

где $з_{\text{ввод}}$ [руб/км], $з_{кF}$ [руб/км·мм^2], $з_{\text{к.п}}$[руб/км] — удельные затраты соответственно на высоковольтный ввод, кабели 10 кВ, их прокладку; $c_{\text{э}}$[руб/(кВт·ч)] — дисконтированная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; ρ[Ом·мм^2/км] — удельное сопротивление материала жилы кабеля; $\lambda_1 = 0{,}5$; $\lambda_2 = 0{,}75$; $\cos\varphi_{\text{н}} = 0{,}94$ — коэффициент мощности нагрузки после компенсации; $N_{\text{т.л}} = 2$; номинальный ток трансформатора $I_{\text{ном.т}} = 58$ А, его коэффициент загрузки $K_{\text{з.т}} = 0{,}8$; время потерь $\tau = 3120$ ч; кабель АСБ-10кВ, $j_{\text{эк}}$

= = 1,4 А/мм^2; высоковольтный кабельный ввод на напряжении 35 кВ. Удельные затраты соответствуют стоимостям на 2013 г.

Решив равенство (3) относительно $P_{\text{н}}$, получаем $P_{\text{н}} = 29\,276$ кВт.

Вывод: при $P_{\text{н}} \geq 29\,276$ кВт экономически целесообразней располагать ГПП 35/10 кВ в геометрическом центре территории ПП при номинальной мощности трансформаторов $S_{\text{ном.т}} = 1000$ кВА и $N_{\text{т.л}} = 2$.

Литература

1. **Конюхова Е.А.** Электроснабжение на напряжении 6—10/0,4 кВ. М.: Изд. дом МЭИ, 2013.

Р.В. Филиппов, О.В. Ахметова, студенты;
рук. К.Н. Мулюкин, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)

АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В современных условиях развития промышленности возрастает роль кабельных линий (КЛ) в системах электроснабжения предприятий. К сожалению, в настоящее время часть ведомственных КЛ на 50—80 % морально и физически изношены, что является одной из главных причин их аварийных отказов.

Анализ показал, что 21 % отказов кабельных линий связаны с процессами ухудшения диэлектрических свойств применяемых материалов, 16 % отказов происходят из-за механических повреждений, вследствие полевых работ, 12 % связаны с влиянием окружающей среды (влаги, температуры, агрессивности среды), 8 % отказов вызваны технологическими дефектами и превышением нагрузки кабеля, около 30 % всех отказов связано с развитием проводящих каналов в толще диэлектрика, 11 % отказов составляют случайные отказы, которые не связаны с другими факторами и не могут быть предотвращены диагностическими методами, 2 % отказов кабельных линий вызваны ошибками эксплуатирующего персонала.

Если анализировать статистику отказов КЛ и степень их влияния на возникающие убытки, то наибольшие убытки возникают при отказах КЛ электропередачи напряжением 6—10 кВ, на которые приходится более 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей.

Одним из вариантов решения этой проблемы является замена КЛ, выработавших свой ресурс, но замена всех КЛ в течение двух или трех лет потребует больших финансовых затрат. Следовательно, замену необходимо проводить постепенно в течение 10—15 лет. Тогда возникает вопрос о надежности существующих КЛ, их ресурсе для дальнейшей работы.

Выходом из этого положения является совершенствование методов диагностики и испытаний КЛ при помощи моделирования дефектов твердой изоляции в КЛ.

В данной работе был проведен анализ причин отказов кабельных линий, а также механизмы их возникновения. Собрана статистика отказов кабельных линий на основании российских и зарубежных публикаций. Разработана подробная классификация методов диагностики и испытания кабельных линий.

Секция 53

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Председатель секции — зав. каф. эл. ст., к.т.н., профессор Ю.П. Гусев
Секретарь секции — ассистент А.А. Антонов

Г.А. Абдухалилов, асп.; рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСУ ТП ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Автоматизация проектирования при разработке рабочей документации для системы контроля и управления (СКУ) электростанций и подстанций позволяет существенно повысить производительность труда проектировщиков и улучшить качество проекта. Это связано с тем, что существенная часть документации состоит из принципиальных и монтажных схем. И если разработка принципиальных схем требует напряжения инженерной мысли, то монтажная документация, включающая схемы кабельных соединений, схемы подключения рядов зажимов, монтажные схемы устройств, могут быть сформированы автоматически, так как содержит в основном информацию из принципиальных схем (марки цепей и номера контактов аппаратов), представленную в другой форме [1].

Реализация СКУ в виде автоматизированных систем управления на основе интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) во многом меняет подходы к проектированию. Принципиальные схемы упрощаются, так как логика работы схемы реализуется контроллером. Значительная часть принципиальной схемы представляет собой схему подключения входных и выходных сигналов ИЭУ. С другой стороны, появились новые документы — таблицы сигналов. Часть сигналов формируется «физически» (от измерительных трансформаторов, блок-контактов выключателей, контактов реле и пр.) Другие сигналы формируются в ИЭУ и передаются только по цифровой сети.

Для поддержания целостности схемотехнической и информационной частей проекта возникает потребность создания в рамках электротехнической системы автоматизированного проектирования (САПР) средств автоматизации формирования баз данных сигналов. В качестве источников формирования базы данных могут выступать как однолинейные схемы электроустановок, так и схемы вторичных цепей. В частности, при разработке систем автоматизации подстанций в соответствии со стандартом

МЭК-61850 проект начинается с описания однолинейной схемы подстанции и логических узлов, «привязанных» к первичному оборудованию.

Литература

1. **Трофимов А.В.** Автоматизация проектирования вторичных цепей электрических станций и подстанций // Электрические станции. 2009. № 10.

И.А. Галишина, студ., М.Е. Чикляев, А.А. Карташова, аспиранты;
рук. В.Ф. Новиков, д.х.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОНКОСЛОЙНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Надежность и безопасность работы энергетической системы являются одними из самых важных ее характеристик. При этом стабильное функционирование системы невозможно без постоянной диагностики работы энергетического оборудования.

В настоящее время существует несколько путей развития большой энергетики: переход на новые типы оборудования, использование возобновляемых источников энергии и т.п. Однако при этом остается актуальным вопрос поддержания в работоспособном состоянии имеющегося оборудования, в том числе и маслонаполненного [1].

Диагностику состояния маслонаполненного электрооборудования проводят различными методами [2]. Хроматографический анализ среди них выделяется возможностью комплексного определения различных параметров, что отражено в рабочих документах по проведению анализа, например, трансформаторных масел.

Наиболее распространенным вариантом планарной хроматографии, применяемой в диагностике, является тонкослойная хроматография. Основные особенности метода: простота оборудования и аналитического эксперимента, возможность быстрого и удобного изменения условий эксперимента, высокая производительность метода, экономичность и низкая стоимость одного анализа.

Основные ограничения этого метода — скорость хроматографического процесса, невысокая воспроизводимость, сложность в автоматизации процесса.

Представленное исследование направлено на совершенствование и оптимизацию метода тонкослойной хроматографии с помощью электромагнитных полей, что позволяет расширить границы применения метода в процессе диагностики состояния маслонаполненного электрооборудования энергетической системы.

Литература

1. **Карташова А.А.** Хромато-масс-спектрометрическое определение ионола в трансформаторном масле // 2-я Интернет-конференция «Грани науки 2013». Казань, 2013. http://grani2.kznscience.ru/participants/sekciya7/KartashovaAA/

2. **Инструментальные** методы анализа. Концентрирование примесей и хроматография. Ч. I / О.Р. Каратаев, А.В. Танеева, А.А. Карташова, В.Ф. Новиков; под ред. В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. — 299 с.

А.В. Кочкина, асп., Н.А. Курилова, Р.П. Нетупский, студенты;
рук. А.В. Малафеев, к.т.н., доц. (МГТУ им. Носова, г. Магнитогорск)

ВНУТРИСТАНЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В настоящее время в связи с увеличением тарифов на электроэнергию становится актуальным наращивание собственной базы генерирующих источников крупными промышленными предприятиями. Электростанции таких предприятий в основном работают на приобретенном природном газе и угле, однако в некоторых промышленных узлах из-за особенностей технологического процесса источники используют топливные смеси из вторичных энергетических ресурсов (коксовый, доменный и конвертерный газы). Таким образом, остро встает вопрос о рациональном использовании покупных и вторичных энергетических ресурсов и, как следствие, оптимальном распределении тепловой и электрической энергии между котлами и генераторами электростанций соответственно.

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «МГТУ» разрабатывается и внедряется на ОАО «ММК» программно-вычислительный комплекс (ПВК) «КАТРАН» с модулями «Оптимизация» и «Оптимизация по тепловой нагрузке», позволяющими определять оптимальную работу котлоагрегатов и генераторов [1]. Авторами разработан алгоритм внутристанционной оптимизации тепловой и электрической энергии, основанный на сочетании модифицированных методов динамического программирования и последовательного эквивалентирования. Алгоритм учитывает особенности тепловых схем электростанций и используемых топливных смесей, разнородность генерирующих источников и тепловую нагрузку по критерию минимума суммарных затрат на пар, необходимый для производства требуемой мощности и тепла. Кроме того модуль «Оптимизация» позволяет осуществлять оптимальное распределение между всеми собственными источниками электроэнергии в промышленной системе электроснабжения.

Модули ПВК «КАТРАН» позволяют планировать оптимальные режимы выработки активной мощности и тепловой энергии в соответствии с тепловыми и электрическими нагрузками и дают возможность улучшить экономические показатели энергохозяйства предприятия.

Литература

1. **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.

В.Д. Кузнецов, асп.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КЗ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ГТУ К ПРОМЫШЛЕННОМУ ПРЕДПРИЯТИЮ

Реформирование российской электроэнергетики привело к тому, что многие промышленные предприятия стремятся стать независимыми по электроснабжению. Эта тенденция привела к строительству отдельных и независимых источников электроснабжения — газотурбинных электростанций как на территории существующих предприятий, так и на вновь создаваемых.

При установке газотурбинных установок (ГТУ) и подключении их к действующему оборудованию необходимо учитывать, что все оборудование выбиралось исходя из расчетов режимов, не учитывающих наличие собственной генерации на объекте.

В работе рассмотрено создание электростанции с ГТУ для электроснабжения действующего газоперерабатывающего комплекса (ГПК). Электроснабжение ГПК осуществляется от двух трансформаторов с расщепленной обмоткой ТРДЦН-100000/220, подключенных к энергосистеме двумя ВЛ. Электроснабжение ГПК характеризуется частыми перерывами и снижениями подводимой мощности, что, несомненно, отражается на экономических показателях ГПК.

Для повышения надежности электроснабжения ГПК предполагается строительство внутризаводской газотурбинной электростанции (ГТЭС), состоящей из четырех ГТУ мощностью по 13,6 МВт и двух ГТУ по 15 МВт, что может привести к увеличению уровня тока короткого замыкания (ТКЗ) в схеме электроснабжения.

Рассмотрены различные способы ограничения ТКЗ для следующих условий: при КЗ в точке К1, находящейся на сборных шинах ГТЭС; при КЗ в точке К2 — месте подключения ГТЭС к схеме электроснабжения ГПК. Критерием необходимого снижения ТКЗ определено значение номинального тока отключения выключателя ($I_{\text{ном.откл}}$ = 40 кА) в схеме ГПК.

Анализ результатов расчета ТКЗ показал, что при прямом подключении генераторов ГТЭС к сборным шинам суммарный ток КЗ (от ГПК и ГТЭС) составляет 84,1 кА. При использовании блочного разделительного трансформатора и линейных реакторов в цепи подключения ГТЭС к ГПК ТКЗ в точке К1 составляет 37,5 кА, что дает возможность выбрать выключатель с номинальным током отключения 40 кА. В точке К2 ток КЗ равен 58,7 кА, что указывает на возможность выбора выключателя с $I_{\text{ном.откл}}$ = 63 кА.

Анализ других способов ограничения ТКЗ также подтвердил необходимость замены электрооборудования в схеме электроснабжения ГПК вследствие повышения уровня ТКЗ.

Б.Е. Машрапов, докторант (ПГУ им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан); рук. М.Я. Клецель, д.т.н., проф. (ТПУ, г. Томск)

РЕЗЕРВНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Электродвигатели широко применяются как на промышленных предприятиях, так и на собственных нуждах электрических станций и подстанций, а их единичные мощности могут достигать десятков мегаватт [1]. Как известно [1], наиболее опасным видом их повреждений являются междуфазные короткие замыкания (КЗ) в обмотке статора. Для защиты от них при мощности $P \leq 5$ МВт устанавливается максимальная токовая защита, при $P > 5$ МВт — дифференциальная, иногда и дифференциально-фазная [2], а установку резервной защиты правила устройства электроустановок не регламентирует. На последней сессии СИГРЭ отмечалось, что установка резервных защит на ЭД необходима [3]. Это в связи с эксплуатацией в настоящее время оборудования, отработавшего свой срок, не вызывает сомнения. Однако апробированных защит ЭД, которые могли бы быть использованы для этих целей, недостаточно. В данной работе предлагается резервная защита от междуфазных коротких замыканий (КЗ) для мощных ЭД (личный вклад автора около 80 %).

Предлагаемое устройство контролирует отношения абсолютных значений токов в фазах электродвигателя как со стороны нулевых выводов, так и со стороны выводов выключателя. Защита через выдержку времени срабатывает на отключение поврежденного двигателя, если со стороны выводов выключателя ток в одной из фаз меньше токов в двух других фазах в k раз, а со стороны нулевых выводов ЭД ток в этой же фазе больше токов в двух других фазах в k раз. В защите при переходе двухфазного КЗ в трехфазное осуществляется так называемый «подхват», выполнение которого давно известно.

Защита может быть использована в качестве резервной на мощных электродвигателях электрических станций и промышленных предприятий, что позволит уменьшить повреждения при отказе основных защит.

Литература

1. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М: Высшая школа, 2008.

2. **А.С. 925220 СССР.** Устройство для дифференциально-фазной защиты электродвигателей / М.Я. Клецель, С.Н. Симонов, В.В. Мусин и др. // Бюл. изобр. 1983. № 48.

3. **Кургузов Н.Н., Кургузова Л.И.** К вопросу о резервной защите мощного электродвигателя переменного тока от междуфазных коротких замыканий // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: 4-я Междунар. научно-технич. конф. Екатеринбург, 2013.

Р.Ю. Мехтиев, студ.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДСТАНЦИЙ

В системах оперативного постоянного тока (СОПТ) подстанций в настоящее время для защиты от коротких замыканий (КЗ) используются плавкие предохранители [1]. Методика выбора проводников для СОПТ, учитывающая влияние на термическую стойкость и невозгораемость теплового спада тока КЗ, электрической дуги [2] и времятоковые характеристики современных плавких предохранителей, отсутствует. По условиям устойчивой работы электроприемников СОПТ с микропроцессорными элементами требует высокого быстродействия защит от КЗ [3].

В докладе рассмотрены особенности выбора проводников для СОПТ с учетом вышеуказанных факторов. Также было проанализировано влияние компоновки оборудования СОПТ на подстанции на сечение проводников и потери напряжения: учитывались емкость аккумуляторной батареи, удаленность щита постоянного тока (ЩПТ), удаленность шкафов распределения оперативного тока (ШРОТ) и удаленность конечных электроприемников.

Исследование выполнено с помощью специально разработанных математических моделей на базе программных комплексов *MathCAD* и *EMTP-RV*.

Результаты исследования будут использованы при разработке методики выбора проводников для СОПТ и при проектировании подстанций. Результаты работы позволят создать компьютерные программы для автоматизированного проектирования СОПТ.

Литература

1. **Гусев Ю.П., Монаков Ю.В., Чо Г.Ч.** Современные требования к системам электропитания релейных защит и автоматики // Релейная защита и автоматизация, 2013, № 3.

2. **Гусев Ю.П.** Совместное действие электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов при коротких замыканиях в электроустановках до 1 кВ // Тезисы докл. Всероссийской научной конференции «Токи короткого замыкания в энергосистемах». М.: РАО «ЕЭС России», 1995.

3. **СТО 56947007-29.120.40.041—2010.** Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования. Стандарт организации.

С.Ю. Панина, А.Д. Сибрина, Л.С. Атякшева, студенты;
рук. Ю.Ф. Лыков, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6—35 кВ

Способ заземления нейтрали определяет ток в месте повреждения, характеристику релейной защиты, уровень изоляции электрооборудования, безопасность персонала. В мировой практике применяют четыре типа заземления нейтрали, в работе рассматриваются достоинства и недостатки каждой из них.

1. Изолированная нейтраль. Достоинство — отсутствие необходимости немедленного отключения однофазных замыканий. Недостатки — большие перенапряжения, возможность возникновения многоместных повреждений.

2. Нейтраль, заземленная через ДГР. Достоинство — полная компенсация емкостного тока. Недостаток — сложность организации релейной защиты.

3. Нейтраль, заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный). Достоинства — отсутствие дуговых перенапряжений, исключение перехода в многофазное замыкание. Недостатки — большой ток в месте повреждения (при низкоомном заземлении), ограничение на развитие сети (при высокоомном заземлении).

4. Глухозаземленная нейтраль в основном применяется в четырехпроводных сетях. Недостаток — невысокая надежность.

При выборе того или иного типа заземления необходимо очертить границы их применения, собрать достоверный статистический материал об уровнях перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в каждом конкретном случае.

Литература

1. **Правила** устройств электроустановок, 7-е издание.

2. **Назаров В.В.** О режимах заземления нейтрали в сетях 6—35 кВ // Промышленная энергетика. 1993. № 6. С. 33—36.

Д.Н. Санжаров, студ.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

О ПЕРЕВОДЕ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6(10) кВ НА РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ НЕЙТРАЛИ

Режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ определяет значительное число параметров: ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании, схему построения релейной защиты от замыканий на землю, уровень изоляции электрооборудования и т.д. От выбора режима заземления нейтрали зависят уровень аварийности в сети, правильная работа защит от замыканий на землю, возможность автоматизации поиска поврежденного фидера и тяжесть последствий возникновения однофазных замыканий на землю.

Если посмотреть на мировую практику эксплуатации сетей среднего напряжения, то в отличие от России, где в сетях 6–35 кВ используются режим изолированной нейтрали и режим заземления через дугогасящий реактор, в других странах чаще всего применяется заземление нейтрали через резистор или дугогасящий реактор. Режим заземления нейтрали через резистор сравнительно новый и используется в России в ограниченном числе сетей 6—35 кВ [1].

При разработке технических аспектов перевода кабельных сетей на резистивно-заземленный режим нейтрали рассмотрен зарубежный опыт эксплуатации сетей с низкоомным, высокоомным и комбинированным резистивным заземлениями нейтрали. Проведен сравнительный анализ режимов заземления нейтрали по следующим критериям: величине емкостного тока при однофазном замыкании на землю, величине возникающих перенапряжений и т.д. И определены наиболее оптимальное место установки и количество заземляющих резисторов в энергосистеме. Обусловлен выбор режима заземления нейтрали в сетях с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), массово внедряющихся в электрических сетях России [2].

Результаты работы могут быть использованы при переводе существующих кабельных электрических сетей Росси на резистивно-заземленной режим нейтрали, а также при оценке режимов работы кабелей с бумажно-масляной и полимерной изоляций СПЭ в этих сетях.

Литература

1. **Титенков С.С., Пугачев А.А.** Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. 2010. № 2.

2. **Шалин А.И.** Резистивное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ с СПЭ-кабелями // Новости электротехники. 2008. № 2(50).

Н.Н. Смотров, студ.; рук. Г.Ч. Чо, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОГРАНИЧЕНИЯ РАДИУСОВ ДЕЙСТВИЯ ПИТАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6 (10) кВ ИСХОДЯ ИЗ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В распределительных сетях Московской области за 2011 год в сравнении с 2010 годом количество аварийных отключений возросло в два раза [1]. Рост количества отключений вызван хаотичным развитием сетей 6 (10) кВ и отсутствием в нормативной документации требований к ограничениям площади территории, покрываемой распределительной сетью 6 (10) кВ, запитанной от одной подстанции (ПС). Ограничение площади характеризуются радиусом действия. В настоящей работе авторами даны рекомендации по ограничению радиусов действия ПС с учетом требований к предельно допустимой суммарной продолжительности отключения нагрузки $T_{доп}$, подключенной к шинам 6 (10) кВ трансформаторных подстанций (ТП), $T_{доп}$ принята согласно [2].

Расчеты $T_{доп}$ в узлах подключения нагрузки 6 (10) кВ проводились в программном комплексе *NEPLAN*. Была разработана расчетная модель нормальной схемы одного токораздела распределительной сети, образованного присоединением 6 (10) кВ ПС. Параметры надежности приняты: для воздушных линий и коммутационных аппаратов — согласно [2], для шин 6 (10) кВ ПС — как элементов с абсолютной надежностью. Были получены из условия непревышения $T_{доп}$ шин 6 (10) кВ ТП предельно допустимые удаленности ТП 6 (10) кВ от ПС, на основе которых при коэффициенте кривизны 1,4 [2] определены расчетные предельно допустимые радиусы действия ПС для разных видов схем и категорий надежности электроснабжения потребителя (табл. 1).

Таблица 1

Радиусы действия центров питания

Вид схемы	Категория надежности	Радиус действия, км
Радиальная	3	8,5
Петлевая	1 / 2 / 3	6,1 / 15,3 / 21,1
Двухлучевая	1	15,7

Литература

1. **Жуков В.В., Максимов Б.К.** // Новости Электротехники. 2012. № 5. С. 5—17.

2. **Кадыков Ю.М**. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. М.: РОСЭП, 1996.

Д.С. Степанова, студ.; рук. И.П. Крючков, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

В электроэнергетических системах возникают не только однократные повреждения, но и комбинации одновременных повреждений различного вида, которые обычно называют сложными повреждениями. Значительная часть повреждений такого вида — двойные повреждения, например: несимметричные короткие замыкания, сопровождающиеся обрывом одной или двух фаз трехфазной цепи, два одновременных обрыва фаз в различных местах, различные комбинации отдельных несимметричных коротких замыканий в двух разных точках электрической сети и т.д. В существующей литературе методика их расчета описана недостаточно строго.

Цели данной работы:

- анализ существующих методов расчета двойных несимметричных повреждений [1] и [2];

- разработка методики расчета двойного повреждения, обусловленного одновременным обрывом провода воздушной линии электропередачи и двухфазным коротким замыканием, а также обрывом провода и двухфазным коротким замыканием на землю;

- разработка электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Расчет сложных несимметричных повреждений».

Для сложных видов повреждений при одновременном наложении обрыва фазного проводника и двухфазного КЗ на землю и без земли получены схемы замещения и аналитические выражения для расчета тока короткого замыкания.

Разработанный учебно-методический комплекс, содержащий курс лекций и материалы практических занятий, предназначен для обучения аспирантов специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Результаты данной работы могут быть использованы для выбора параметров срабатывания релейной защиты линий электропередачи при сложных видах несимметрии в электрических сетях.

Литература

1. **Короткие** замыкания и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

2. **Лосев С.Б., Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1983.

Я.С. Столярова, студ.; рук. Д.Ф. Губаев, к.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА (АВТОТРАНСФОРМАТОРА)

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются одним из самых дорогостоящих видов электротехнического оборудования электрических подстанций.

При нагрузке трансформаторов начинается его нагрев. Кратность и длительность допустимой перегрузки определяется исходным тепловым состоянием трансформатора. Перегрузки бывают двух видов — систематические и аварийные. Воздействие систематических перегрузок на изоляцию компенсируется работой трансформатора в часы малой нагрузки. Воздействие аварийных перегрузок носит более губительный характер.

Рассмотрим подстанцию с двумя параллельно работающими трансформаторами. При отключении одного трансформатора второй начинает работать под удвоенной нагрузкой. Длительная работа трансформатора в таком режиме недопустима. Следовательно, необходимо его разгрузить. Разгрузка может осуществляется согласно правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) [1].

При разгрузке трансформатора согласно ПТЭЭП довольно грубо определяется допустимый коэффициент перегрузки. Отключение потребителей, которые могли бы остаться в работе, влечет за собой экономические потери, потери необходимо снижать.

Существуют устройства, рассчитывающие допустимые перегрузки и снижение срока службы трансформатора. Эти устройства дорогостоящие, и потому находят редкое применение. Однако имеется другой способ снижения экономических потерь — согласно алгоритму, описанному в ГОСТ 14209—97 [2]. В настоящее время разрабатывается программный модуль с использованием *MatLab*, при помощи которого персонал сможет более точно проводить расчет допустимого коэффициента перегрузки с учетом температуры окружающей среды и типа системы охлаждения.

Литература

1. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: 2003.

2. **ГОСТ 14209—97.** Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов (Год введения — 2002).

В.А. Трофимов, асп.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6—20 кВ

Необходимым условием для обеспечения надежного электроснабжения потребителей, а также обеспечения безотказной работы современных видов оборудования, является локализация и быстрое отключение коротких замыканий (КЗ). В настоящее время большинство релейных защит (РЗ) в распределительных сетях построены на базе электромеханических реле и во многих случаях не соответствуют требованиям по чувствительности и селективности. Проблему неселективной и нечувствительной работы защит можно решить путем замены электромеханических реле на микропроцессорные (МП), однако при этом важно правильно выбрать характеристики срабатывания МП РЗ.

Для оценки эффективности МП РЗ была разработана расчетная модель реальной распределительной сети в программном комплексе *NEPLAN* [1]. Модель содержит информацию о первичном и вторичном оборудовании, а также параметры РЗ и времятоковые характеристики предохранителей. С помощью модели был решен ряд задач: расчет токов КЗ, коэффициентов чувствительности, построение карт селективности с учетом разброса времятоковых характеристик (ВТХ) защит, согласование защитных характеристик и термической стойкости кабелей.

В результате сопоставления РЗ, выполненных на базе электромеханических реле и МП РЗ, были выявлены преимущества МП РЗ, позволяющие повысить чувствительность РЗ, обеспечить селективность с плавкими предохранителями силовых трансформаторов, а также в некоторых случаях увеличить число уровней защит в распределительной сети.

Были сопоставлены нормально инверсные, сильно инверсные, чрезвычайно инверсные, а также независимые характеристики срабатывания МП РЗ и их комбинации. Установлено, что выбор оптимальных характеристик срабатывания МП РЗ невозможен без построения карт селективности, в которых учитывается возможный разброс ВТХ защит и плавких предохранителей.

Литература

1. **Гусев Ю.П.** Интеллектуальным сетям России комплексную интеллектуальную поддержку МЭИ // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Тр. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. ЭНЕРГО-2012. М.: МЭИ, 2012. Т.1. С. 26—31.

Г.А.Филатова, асп.; рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КАБЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6—10 кВ

В сетях 6 — 10 кВ для выполнения защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), а также для определения места ОЗЗ (ОМЗЗ) на линиях, достаточно широкое применение получили устройства, основанные на использовании электрических величин переходного процесса. Указанные устройства по цепям тока подключаются, как правило, к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП). Поэтому для решения задач, связанных с совершенствованием защиты от ОЗЗ и устройств ОМЗЗ, представляет практический интерес исследование работы кабельных ТТНП в переходных режимах ОЗЗ.

В устройствах защиты от ОЗЗ и ОМЗЗ на основе переходных процессов, как правило, используется диапазон частот до ~5 кГц. Для экспериментальных исследований динамических режимов ТТНП в указанном диапазоне частот токов переходного процесса при ОЗЗ до ~1 кГц применялся метод физико-математического имитационного моделирования с использованием программно-аппаратного комплекса РЕТОМ-51, а при частотах колебаний переходного тока от 1 до 5 кГц — метод физического моделирования. Для получения тестовых сигналов переходных токов ОЗЗ, записанных в COMTRADE-формате, для устройства РЕТОМ-51 использовалась система моделирования MatLab.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что кабельные ТТНП наиболее широко применяемого типа ТЗЛМ при малых вторичных нагрузках ($Z_в \leq 1$ Ом) и амплитудах первичных переходных токов от единиц ампер до 500 А с частотой колебаний до 5 кГц обеспечивают погрешности по току, не превышающие допустимые 10 % (рис. 1).

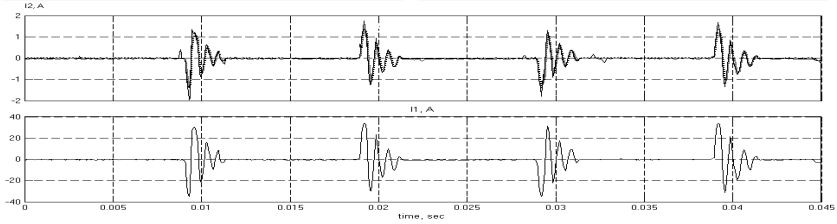


Рис. 1. Осциллограммы вторичного (верхняя осциллограмма) и первичного токов ТТНП типа ТЗЛМ при активной нагрузке $R_н$ = 0,4 Ом при дуговом перемежающемся ОЗЗ

Исследования при больших значениях амплитуд переходных токов, обуславливающих возможность насыщения магнитопровода трансформатора тока, выполнялись на математических моделях сетей 6—10 кВ и ТТНП. Результаты моделирования на ЭВМ подтверждают, что ТТНП при вторичных нагрузках $Z_в \leq 0{,}1$ Ом способны с допустимыми погрешностями трансформировать переходные токи ОЗЗ с амплитудами до ~1000 А.

Секция 54

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Председатель секции — к.т.н., профессор Т.А. Шестопалова
Секретарь секции — зав. учеб. лаб. Д.Н. Кунакин

Й.А. Альварес Кирога, студ.; рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СОСТОЯНИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В ВЕНЕСУЭЛЕ

Национальная электроэнергетическая система Венесуэлы достигает 24 000 МВт установленной мощности, 65 % электроэнергии осуществляется от ГЭС, 32 % — от ТЭС и 2 % — от дизельных установок [1]. Самые крупные гидроэлектростанции находятся на реке Карони в регионе Гайана. В настоящее время в Венесуэле эксплуатируются следующие гидроэлектростанции:

1) ГЭС имени Симона Боливара. Третья станция в мире по мощности после китайской «Санься» и бразильской «Итайпу» — 10235 МВт;
2) ГЭС имени Антонио Хосе Де Сукре — 3154 МВт;
3) ГЭС имени Франциско Де Миранда — 2160 МВт;
4) ГЭС имени Леонардо Руиз Пинеда — 300 МВт;
5) ГЭС имени Генерала Хосе Антонио Паеза — 240 МВт;
6) ГЭС имени Хуана Антонио Родригеза Домингеза — 80 МВт;
7) ГЭС Маспарро — 25 МВт;
8) ГЭС имени Мануеля Пиара (строится) — 2160 МВт;
9) ГЭС имени Фаврисио Охеда (строится) — 514 МВт.

ГЭС имени Мануеля Пиара установленной мощностью 2160 МВт (10 повторно-лопастных турбин) и годовой выработкой электроэнергии 12100 ГВт·ч строится и будет последней ГЭС в каскаде на реке Карони. В мае 2013 года ГЭС была построена на 84,27 %. Пуск этой ГЭС назначен на 2014 год и сэкономит стране 78000 баррелей нефти в год.

Строительство ГЭС имени Фаврисио Охеда находится на реке Капаро и состоит из двух радиально-осевых турбин установленной мощностью 514 МВт. Данная ГЭС обеспечит электроэнергией 6 млн людей и предприятия по производству нефти и фосфата. В настоящее время ГЭС имени Фаврисио Охеда построена на 95 %.

В Венесуэле был электроэнергетический кризис в 2009—2010 гг. из-за продолжительной засухи, которая вызвала в водохранилище ГЭС Симона Боливара очень низкий уровень воды. Это произошло во время появления

урагана Эль-Ниньо в июле 2009 года. 29 августа 2010 года водохранилище Гури достигло своего оптимального уровня [2].

Литература

1. **Национальная** электрическая корпорация Венесуэлы http://www.corpoelec.gob.ve

2. **Венесуэльское** агентство новостей http://www.avn.info.ve

К.В. Аржанов, асп.; рук. Ю.А. Шиняков, д.т.н. (ТУСУР, г. Томск)

СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА СОЛНЦЕ

Наведение солнечных панелей на Солнце позволяет повысить энергетическую эффективность фотоэнергетических установок (ФЭУ) не менее чем на 30 %. На рис. 1 приведена фотография разработанной в ТУСУР ФЭУ. Наведение солнечных панелей на Солнце осуществляется при помощи шаговых приводов, контроллера наведения и двух датчиков положения Солнца (по азимуту и по углу места). Направление перемещение определяется разницей в токах наклонных плоскостей фотоэлементов датчика. Если фотоэлементы в наклонных плоскостях выдают одинаковый ток, то перемещать раму с солнечными панелями не требуется, а если есть отличие, то необходимо перемещение в таком направлении, чтобы скомпенсировать эту разницу по току датчика. Если тыловой фотоэлемент датчика выдает самый больший ток, то Солнце светит с обратной стороны рамы и необходимо развернуть раму в направлении Солнца. Перемещение происходит в режиме позиционирования (с ограничениями по скорости и ускорению в приводе) При этом проведена минимизация затрат электрической энергии на наведение [1]. ФЭУ установлена на крыше одного из корпусов ТУСУР.



Рис. 1. Фотография разработанной ФЭУ

Литература

1. **Минимизация** энергопотребления электроприводами в фотоэлектрической энергетической установке / В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 4. С. 146—150.

В.С. Афонин, асп.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ОБОРУДОВАНИЯ ВИЭ

Актуальность работы. Энергетика является инерционной сферой экономики, и продвижение в нее новых технологий занимает десятилетия. Поэтому необходимо готовиться к перестройкам, развивая перспективные технологии и источники энергии [1]. Согласно прогнозу МЭА к 2035 г. мировое потребление энергии возрастет в 1,5 раза. Быстрее всего будет развиваться НВИЭ. Вклад НВИЭ в энергетический баланс возрастет примерно с 6 до 13,5 % [2]. Поэтому актуальной является задача энергоснабжения потребителя системами на базе ТНУ, СК и СФЭМ для обеспечения тепло-, холодо- и электроснабжения.

Цель работы. Разработка методического обеспечения расчетов энергокомплексов автономного потребителя на основе ТНУ, СК и СФЭМ.

Результаты работы. Был разработан оптимальный энергокомплекс для потребителя: СФЭМ работают параллельно с сетью (сеть является аккумулятором), ТНУ работает для отопления и кондиционирования, СК работают для ГВС (летом излишки тепловой энергии сбрасываются в скважину для ее теплового восстановления).

Данная схема совместной работы теплового насоса и солнечных коллекторов рассмотрена для ряда потребителей, характерных для ЕЧР.

Следующие результаты получены из расчетов:

1) СК сбрасывают излишки тепла в грунт в течение лета;

2) 87 % выработки СК — на систему ГВС, 13 % сброшено в скважины;

3) среднегодовая температура скважин без применения солнечных коллекторов составила 0 °С, с их применением 6 °С.

Выводы. Была доказана существующая проблема энергоснабжения автономных потребителей. Было предложено исследование использования НВИЭ в системах энергоснабжения. Разработаны методики оптимизации параметров систем энергоснабжения на базе ТНУ, СК и СФЭМ. Доказано, что при сбросе излишков тепла от СК в грунт происходят тепловое восстановление скважины, повышение СОР теплового насоса и снижение потребления им электроэнергии.

Литература

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Энергетика в современном мире. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект». 2011. — 168 с.

2. **PV Status Report.** Arnulf Jäger-Waldau, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit. Ispra (VA), Italia. 2010. — 124 с.

М.Р. Бавин, асп., Б.Т. Шохзода, студ.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕМЕНТА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ

КПД СЭ, а значит, и установки в целом, зависит от спектрального состава и плотности потока солнечного излучения, поступающего на их поверхности. Указанные параметры СИ меняются в течение дня, что приводит к изменению характеристик преобразователей. Поэтому для оценки значений энергетической эффективности солнечных фотоэлектрических установок в реальных условиях эксплуатации было проведено исследование изменения КПД кремниевых и многопереходных СЭ под воздействием солнечного излучения со спектральным составом, близким к реальному. Для генерации спектров СИ была выбрана программа SMARTS2.

Смоделированные программой спектральные распределения использовались для расчета плотности фототока, генерируемого кремниевым солнечным элементом или отдельными переходами многопереходных фотоэлементов.

Отличительная особенность работы многопереходных СЭ в реальных условиях эксплуатации состоит в том, что изменение спектрального состава солнечного излучения в течение дня приводит к изменению величин фототоков, генерируемых отдельными *p-n*-переходами многопереходного СЭ. В утренние и вечерние часы (AMX > AM1,5), когда в спектре превалирует красное излучение, многопереходный СЭ, оптимизированный для стандартных условий AM 1,5D, будет находиться в режиме ограничения током верхнего (первого) *p-n*-перехода и, наоборот, в полуденные часы (AMX < AM1,5), когда в спектре основное излучение синие — в режиме ограничения током среднего (второго) *p-n*-перехода. Кремниевые же элементы практически не реагируют на изменение спектрального состава излучения.

М.Р. Бавин, асп.; рук. Т.А. Шестопалова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОТОЭЛЕМЕНТА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ

Одной из важнейших задач при разработке фотоэлектрической голографической батареи является теоретическое определение ее теплового баланса и определение на основании этого рабочей температуры фотоэлемента при различных условиях. Для решения этих задач применительно к голографическому фотоэлектрическому модулю была составлена схема теплообмена фотоэлемента с окружающей средой и были определены величины отводимых и подводимых тепловых потоков.

Расчетная схема процессов теплопередачи в фотоэлектрическом модуле представлена на рис. 1.

В процессы теплообмена в данном случае можно разделить на три составляющие:

1) лучистый теплообмен: от голографического концентратора к фотоэлементу ($Q_с$, $Q_а$), тепловые потоки отводимые излучением от фотоэлемента ($Q_{мод}$), тепловой поток от земли ($Q_з$);

2) конвективный теплообмен ($Q_к$);

3) тепловыделения в результате преобразования солнечного излучения в электрическую энергию ($Q_п$).

В результате составления уравнения теплового баланса фотоэлемента голографической солнечной батареи получена система уравнений, решение которой относительно температуры фотоэлемента численным методом позволяет определять рабочую температуру фотоэлемента.

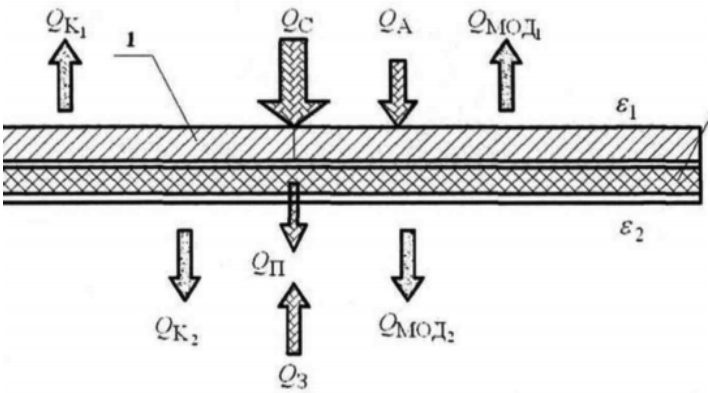


Рис. 1. Расчетная схема процессов теплопередачи в фотоэлектрическом модуле

А.Б. Васенин, асп. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева);
рук. О.В. Крюков, к.т.н., доц., (ОАО «Гипрогазцентр», г. Н.Новгород)

НЕЧЕТКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Очевидные преимущества ветроэнергетики (малое воздействие ветроэнергетических установок (ВЭУ) на природу, отсутствие больших капитальных затрат на строительство и обслуживание) нивелируются недостатками — высокочастотным излучением и малым диапазоном выработки требуемой мощности при изменении параметров ветра [1]. При скоростях ветра менее номинальных значений необходимо вырабатывать максимально возможную мощность, а при высоких скоростях — номинальную. Ресурс регулирования параметров ВЭУ меньше изменений мощности.

Для решения данной проблемы необходимо использовать нечеткие понятия и знания, которые описывают процесс регулирования при помощи продукционных правил «если — то». Использование аппарата нечеткой логики для задач регулирования наиболее применимо для стохастических систем с плохо формализованными процессами [2].

Эффективная система ВЭУ, работающая при стохастическом изменении параметров энергоносителя, должна использовать аппарат нечеткой логики, 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 алгоритмами нечеткого вывода;
- разработана системная модель нечеткой САР мощности ВЭУ;
- проведен сравнительный анализ ПИД- и Fuzzy-регуляторов.

Результаты исследования работы САР ВЭУ на нечеткой логике:

- увеличивается мощность ВЭУ в режиме рабочих ветров до 5—7 %;
- точное поддержание номинала мощности ВЭУ в режиме ограничения;
- эффективное Fuzzy-регулирование ВЭУ по типу «если — то»;
- наиболее эффективное применение Fuzzy-регуляторов характерно для скорости ветра 5÷12 м/с при максимуме коэффициента использования;
- алгоритмы Ларсена и Мамдани показали свою эффективность;
- ПИД- и Fuzzy-регуляторы аналогичны при вывода ВЭУ из работы.

Литература

1. **Крюков О.В., Титов В.В.** Разработка АСУ автономными ветроэнергетическими установками// Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 35—37.

2. **Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б.** Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // V научная конференция «Управление в технических системах (УТЭОСС-2012)». СПб.: ИПУ, 2012. С. 467—469.

А.Н. Викулов, студ.; рук-ли Т.А. Шестопалова, к.т.н., доц., А.Г. Васьков, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕК АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Имея весьма развитию систему рек, Архангельская область снабжается энергией лишь за счет тепловых электростанций, являясь при этом энергодефицитным регионом. В работе проведено исследование валового потенциала рек региона с целью оценки возможности использования водных ресурсов для электроснабжения.

Оценка проводилась с помощью геоинформационной системы (ГИС) ArcGIS. Для формирования речной системы использовались данные о рельефе из базы данных ASTERGDEM; проводилась разбивка водотоков на расчетные створы, и в каждом из них определялись площади водосбора и перепад высотных отметок (напор). Для определения расходов воды в реках региона использовался метод модуля стока. Модуль стока рассчитывался для каждого расчетного створа исходя из информации о выпавших осадках в каждой точке координатной сетки, покрывающей исследуемый регион. Поскольку натурных данных наблюдений для этого было недостаточно, информация по выпавшим осадкам дополнялась данными из базы данных NASA. Из известных модуля стока и площади водосбора определялся расход в каждом створе, а расход на отдельных участках водотока — методом линейного учета.

Суммарное значение валового потенциала Архангельской области составило 11056 млн. кВт·ч/год. На рис. 1 представлена динамика суммарного энергопотребления Архангельской области в сравнении с превосходящим ее валовым гидроэнергетическим потенциалом ее рек, что свидетельствует о целесообразности более широкого использования гидроэнергии в энергетическом балансе региона.

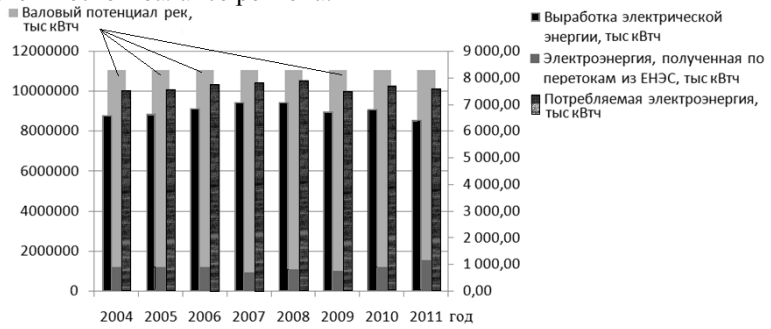


Рис. 1. Сравнение величины валового потенциала рек и производства и потребления энергии в Архангельской области

Т.С. Глушкова, студ.; рук. А.Г. Васьков, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАХ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Основной критерий при моделировании гибридных энергетических комплексов и оптимизации их состава и параметров — выполнение баланса мощности и энергии. В этом случае необходимо обеспечение равенства нулю свободной энергии, что возможно двумя способами: либо регулированием мощности генераторов, либо применением аккумуляторов, причем последнее, как показывает опыт [1, 2], повышает эффективность работы комплекса. При моделировании энергокомплексов, включающих в свой состав системы аккумуляции, необходимо учитывать зарядные характеристики аккумуляторных батарей (АКБ), а также затраты энергии на поддержание уровня заряда АКБ.

На базе существующей Батамайской СЭС 30 кВт рассматривались варианты внедрения системы аккумулирования энергии с использованием гелеевых АКБ.

Моделирование разных вариантов составов энергокомплекса показал, что наиболее энергоэффективным вариантом будет энергокомплекс, включающий: 350 СФЭУ пиковой мощностью $W_{\text{пик}}$ = 195 Вт и 35 аккумуляторов емкостью 220 А·ч каждый, что позволит снизить расход топлива на существующей Батамайской ДЭС на 15 %.

При увеличении числа используемых АКБ выше некоторого критического числа эффективность их использования снижается из-за пропорционального увеличения потерь на саморазряд.

Проведенные расчеты показали необходимость учета особенностей зарядных характеристик АКБ как на стадии проектирования (путем определения их оптимального числа), так и при эксплуатации (алгоритм управления работой энергокомплекса должен предусматривать возможность отключения АКБ в те периоды времени, когда суточная свободная энергия не превышает суточных потерь энергии на саморазряд АКБ).

Литература

1. **Отчет** о работе Батамайской солнечной электростанции установленной мощностью 30 кВт за период 26.07.2012 — 05.11.2012 г.
http://energiumrussia.ru/files/users/95/otchet.pdf

2. **Solar** Stand-Alone Power and Backup Power Supply
http://files.sma.de/dl/10040/INSELVERSOR-AEN101410.pdf

И.А. Данилов, В.К. Ткачев, студенты; рук. К.В. Трубицын, ст. преп.
(СамГТУ, г. Самара)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЭУ В СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

В России доля выработки электрической энергии с помощью ветроэнергетических установок (ВЭУ) составляет менее 0,01%. Всего же на данный момент доля мирового электропотребления, приходящаяся на ветроэнергетику, составляет около 3 %.

Определим энергетические и конструктивные параметры ВЭУ, потенциально снабжающей электрической энергией структурное подразделение Самарского государственного технического университета — спортивно-оздоровительный лагерь (СОЛ) «Политехник».

Данные для расчета.

Пусть дано количество потребителей энергии в лагере — $M_{\text{п}} = 20$ жилых коттеджей. Норма выработки электроэнергии в расчете на одного потребителя $n_{\text{п}} = 3600$ кВт·ч в год. Время работы ВЭУ в течение года $\tau = 320$ суток. Средняя скорость ветра за время работы ВЭУ принимаем $\upsilon_c = 4$ м/с . Расчетная скорость ветра, при которой обеспечивается установленная мощность ВЭУ $\upsilon_{\text{р}} = 8$ м/с . Коэффициент мощности ВК $C_P = 0{,}37$. Удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭУ $k_n^{\text{ВЭУ}} = 1000$ евро / кВт [1].

Результаты расчета.

Установленная мощность ВЭУ при заданной расчетной скорости ветра получается равной 34,4 кВт.

Необходимая мощность ДЭС (дизель-генераторной установки) — 11,4 кВт.

Удельная экономия затрат на топливе при комбинированном использовании ВЭУ и ДЭС рассматривается как нижняя граница тарифа на электроэнергию, которая в отсутствии ВЭУ+ДЭС была бы выработана традиционной энергоустановкой.

Полученное значение удельной экономии затрат сопоставимо со средней ценой тарифа на электроэнергию по России для организаций (4,6 руб. за 1 кВт·ч).

Литература

1. **Соляр А.Б.** Об эффективности использования ветроэнергетических установок в Самарской области // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов Всерос. студ. олимпиады, научно-практ. конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т, 2012.

П.Д. Диас Леон, студ.; рук. А.Ю. Солдаткин, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В ВЕНЕСУЭЛЕ

Мощность всех генерирующих мощностей энергосистему Боливарианской Республики Венесуэлы достигает 24 854 МВт. Генерация подразделяется по следующим видам: 17,8 % вырабатывается дизельными электростанциями, 15,5 % — ТЭС на газу, 3,1 % — ТЭС комбинированного цикла, 59,7 % — ГЭС, а также распределенная генерация составляет порядка 3,8 %. Кроме традиционных «больших» ГЭС в Венесуэле используются малые ГЭС, которые расположены в бассейне реки Карони [2]. В настоящее время существуют семь малых гидроэнергетических объектов:

- МГЭС имени Араутамеру, 150 кВт;
- МГЭС имени Каванайен, 110 кВт;
- МГЭС имени Камарата, 60 кВт;
- МГЭС имени Канайма, 800 кВт;
- МГЭС имени Куао, 30 кВ;
- МГЭС имени Ла Сьюдадела, 120 кВт;
- МГЭС имени Уонкен, 58 кВт.

В настоящее время, чтобы сделать энергосистему безопаснее, ведутся исследования рек, которые расположены в трех основных регионах страны. Эти объекты созданы для того, чтобы развивать так называемое электрическое кольцо безопасности, которое стабилизирует и улучшит качество поставок электроэнергии по всей стране. Это кольцо состоит из малых ГЭС на Среднем Западе, в штатах Андинского региона и в регионе Гаяны. В этих местах проводят технико-экономические исследования для реализации проектов малых ГЭС, так как в этих регионах высокий уровень осадков, поэтому крайне важно изучить и подобрать наиболее подходящее место для использования этих естественных ресурсов. Их использование снизит негативное воздействие на окружающую среду и потребление ископаемого топлива. В 1983 году было установлено, что в стране есть возможности для производства и использования турбин Страфло, Мишеля Банки, Ковшевых, Пелтона и Фрэнсис мощностью от 25 до 500 кВт [1, 2]. Был также сделан вывод о том, что может быть установлено 7015 турбин суммарной установленной мощностью 394 749 кВт.

Литература

1. **Надежное** обеспечение энергией с микро-ГЭС в CVG EDELCA. http://www.fedeta.org/pdf/ext_08.pdf 2.

2. **Микро-ГЭС** в Венесуэле.
http://www.monografias.com/trabajos13/micro/micro.shtml

А.Т. Жумагажинов, студ.; рук. С.Х. Койбагаров, к.т.н., и.о. доц.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан)

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ПРИ АНАЭРОБНОМ СБРАЖИВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Актуальность рассматриваемой проблемы вызвана необходимостью более полной утилизации отходов органического происхождения в агропромышленном комплексе за короткий срок и повышения выхода биогаза при анаэробном сбраживании [1].



Рис. 1. Механизмы ускорения процессов в гетерогенных средах

Работа посвящена разработке способа повышения выхода биогаза за счет активации механохимических реакций под воздействием ультразвука на водный органический субстрат и теоретическому обоснованию предлагаемого процесса [2,3].

Разработанная экспериментальная установка обеспечивает повышение выхода биогаза из водного органического субстрата и эффективную переработку органических отходов сельскохозяйственного производства [4,5]. Ультразвуковая технология способствует повышению выхода биогаза с единицы поверхности сбраживаемого вещества при одновременном получении экологически чистых органических удобрений.

Литература

1. **Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М.** Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982.

2. **Акопян В.Б., Ершов Ю.А.** Основы взаимодействия ультразвука с «биологическими объектами» (ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии). М.: Изд-во РГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

3. **Бейли Дж., Оллис Д.** Основы биохимической инженерии: пер. с англ. В 2 частях. Ч. 2. М.: Мир.

4. **Балдаев Р., Раджен-дран В.** Применения ультразвука. М.: Техносфера, 2006.

5. **Применение** ультразвука высокой интенсивности в промышленности // В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков и др. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010.

Г.Г. Загидуллин, студ.; рук. А.И. Рудаков, д.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ВЕТРОГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Рост мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) приводит к увеличению территории, занимаемой ВЭУ, и как правило создает целый ряд проблем, особенно заметных в европейских странах с их высокой плотностью заселения территории.

Существует необходимость снижения до двух раз и более вредных выбросов от энергетических установок в отдельных городах со сложной экологической обстановкой. Например, в ряде курортных городов как Нарзан, Ессентуки на более чем в 5000 квадратных километров 1350 котельных, где предельно допустимая концентрация газов превышена в 10—100 раз.

При оценке эффективности использования ВЭУ необходимо учитывать дополнительные эффекты, с которыми связано их функционирование. К таким эффектам относятся: мощностной, топливный, экологические эффекты, эффект от выработки реактивной мощности [1]. Целью данной работы является проектирование энергоэффективной ветрогидроаккумулирующей установки.

Принцип работы установки заключается в том, что установка поднимает воду на высоту в большой резервуар, когда есть ветер. Тем самым вода получает кинетическую энергию. В безветренную погоду вода будет выпускаться и тем самым вырабатывать электрическую энергию в генераторах. Стоимость аккумуляторных батарей зачастую находится на уровне цены ветрогенератора, поэтому для повышения энергоэффективности будем использовать энергию воды как накопитель электроэнергии [2].

По причине низких скоростей ветра на территории Российской Федерации будем использовать усовершенствованную модель ветроколеса, похожую на турбину самолета, которая будет нагнетать воздух в пропеллеры ветроустановки. Модель турбоветроколеса будет увеличивать скорость ветра до 37 %.

Литература

1. **Безруких П.П.** Концепция использования ветровой энергетики России / под ред. П.П. Безруких. М.: Лента, 2005. — 128 с.

2. **Бут Д.А.** Накопители энергии: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1991. — 400 с.

Карлос Фернандес, асп.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ В ВЕНЕСУЭЛЕ

Венесуэла — нефтедобывающая страна, значительное место в энергобалансе которой занимают тепловые станции. Она занимает второе место в Латинской Америке по производству энергии на больших гидроэлектростанциях. Венесуэла заинтересована в увеличении экспорта органического топлива, в связи с чем актуальна задача использования возобновляемых источников энергии для электроснабжения населения [1].

Самыми важными альтернативными источниками энергии в Венесуэле являются солнечная и ветровая энергии. В настоящее время способность к эффективной генерации этих видов энергии не является значительным в энергетическом балансе страны. Но их использование имеет высокие шансы на успех, поскольку скорость ветра в некоторых районах страны достигает свыше 7 м/с, а местоположение страны недалеко от линии экватора позволяет солнечной радиации в некоторых местах достигать свыше 5,5 кВт/м^2 [2].

Внедрение установок, использующих возобновляемые виды энергии, в топливно-энергетический комплекс страны позволит увеличить доходы от экспорта нефти, которые являются основой экономики Венесуэлы. Кроме того, сокращение внутреннего использования органического топлива будет способствовать выполнению международных обязательств и соглашений страны по сокращению вредных выбросов в атмосферу.

Использование энергокомплексов на основе солнечной и ветровой энергий для обеспечения как потребителей, подключенных к Национальной электрической сети, так и изолированных потребителей, позволит сократить потребление органического топлива и улучшить экологическую обстановку в стране, сократив выбросы CO_2, постепенно разрушающие озоновый слой, и уменьшив зависимость от ископаемых видов топлива.

Литература

1. **Производство** электроэнергии. Венесуэла, Министерство энергетики и нефти.

2. **CEPAL 2011**. Использование потенциала альтернативных источников энергии в Венесуэле http://www.mppee.gob.ve

Е.В. Коваленко, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Для обеспечения теплом зданий для коммунально-бытовых и технологических нужд потребителей в России преимущественно используется централизованное теплоснабжение. В основе него лежит принцип снижения расхода топлива и эксплуатационных затрат. Однако опыт эксплуатации тепловых сетей показывает, что в ряде случаев до 50 % транспортируемой теплоты не доходит до потребителя, а с каждым годом эксплуатация и ремонт тепловых сетей обходится все дороже. В качестве примера приведем результаты испытания тепловых сетей в Тюмени, которые проводились методом температурной волны в мае 2013 г. Было выявлено большое количество повреждений: 3 — на магистральных сетях и около 30 — на разводящих сетях. Кроме того, некоторые участки во время проведения испытаний были отключены, так как заранее было известно, что испытания они не выдержат. Износ тепловых сетей составляет по отдельным муниципальным образованиям и поселениям от 30 до 87 %.

В связи с этим все более осознается целесообразность комбинированного производства электрической и тепловой энергии на установках, располагаемых в непосредственной близости от потребителя. Это связано с постоянным удорожанием электрической и тепловой энергии, учащением случаев возникновения аномальных шквальных ветров и заморозков, приводящих к снижению надежности централизованного энергоснабжения. Для повышения надежности теплоснабжения рекомендуется применение теплового аккумулятора для создания запаса тепловой энергии в период времени, когда имеется ее избыток, с последующей отдачей ее потребителю. Для обеспечения надежного энергоснабжения существует возможность использования гибридных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), совмещенных с дизельными электростанциями, а также станциями, использующими местные источники топлива. В Тюменской области уже доказана эффективность замены устаревших котельных на новые, работающие на отходах деревообработки, запасы которых составляют 16,3 млн $м^3$ в год, при этом освоение этих запасов в 2012 году составило всего 8,7 %. Оценка возможности использования в целях теплоснабжения установок на основе ВИЭ в настоящее время находится в стадии изучения. Однако можно отметить, что технический ветровой потенциал Уральского региона составляет около 383 ТВт·ч/год.

Ю.С. Кузьмина, асп., Г.А. Сычев, соиск.;
рук. В.М. Зайченко, д.т.н., ст.н.с. (ОИВТ РАН)

ПРОЦЕСС ТОРРИФИКАЦИИ ПЕЛЛЕТ ИЗ БИОМАССЫ

Торрификация представляет собой процесс предварительной термической обработки измельченной или гранулированной биомассы при температурах до 300 °С. Процесс торрификации сопровождается не только удалением влаги, т.е. сушкой, исходного сырья, но и термической деструкцией гемицеллюлозы, входящей в состав биомассы. В результате образуется твердый гидрофобный продукт. Сочетание торрификации и пеллетирования приводит к повышению удельной теплоты сгорания биомассы. В зависимости от условий теплота сгорания торрифицированных гранул из древесных отходов может достигать величины 19—23 МДж/кг [1].

Основные типы реакторов, представленные на мировом рынке: шнековый (винтовой) реактор с непрямым нагревом; прямой нагрев во вращающемся барабане; прямой нагрев в дисковом реакторе, прямой нагрев в движущемся и псевдоожиженном слое [2].

В ОИВТ РАН была создан реактор торрификации биомассы непрерывного действия с движущимся слоем гранул производительностью 30 кг/ч, использующий в качестве теплоносителя продуктов сгорания газопоршневого двигателя [3]. В качестве исходного сырья использовались торфяные, соломенные и древесные пеллеты, а также пеллеты из пометно-подстилочной массы. В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что теплота сгорания пеллет увеличилась в 1,5 раза в сравнении с исходным сырьем, а гигроскопичность уменьшается на 20 %, что в значительной мере влияет на стоимость транспортировки и хранения пеллет. За счет высокого коэффициента теплообмена обеспечивается эффективный нагрев перерабатываемого сырья (по сравнению со схемами, в которых подвод тепла осуществляется через стенку реактора). Предложенная схема представляет собой когенерационную установку, позволяющую вырабатывать электроэнергию и утилизировать производимое при этом тепло в целях повышения потребительских свойств твердого топлива из биомассы.

Литература

1. **Zaichenko V.M., Kosov V.F., Kosov V.V. et. al.** The new technology of complex thermal conversion of biomass // 9th International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, 16—18 July 2012, Malta.

2. **Ronald Meijer.** Overview of European torrefaction landscape // EPRI Biomass Torrefaction Workshop. Pensacola. FL. US April 13—14. 2011.

3. **Установка** по торрификации биомассы / А.В. Бессмертных, В.Ф. Косов, Ю.С. Кузьмина, Г.А. Сычев // V Школа молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», Махачкала, 2012.

В.А. Лавренов, Ю.С. Кузьмина, аспиранты;
рук. В.М. Зайченко, д.т.н., ст.н.с. (ОИВТ РАН)

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗ БИОМАССЫ ГАЗА С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

На сегодняшний день проблема утилизации отходов является крайне актуальной. Одновременно с этим отходы представляют собой возобновляемый источник энергии. Один из известных способов преобразования твердых горючих отходов биомассы в энергетический газ — термохимическая конверсия, представляющая собой термическое разложение углеродосодержащих материалов. В определенных условиях, связанных с концентрацией окислителя, температурой и типом осуществления процесса, возможно получить энергетический газ, пригодный для использования в газопоршневых мини-электростанциях. Основными трудностями при газификации являются сложная система очистки и низкая теплота сгорания получаемого газа (3—6 МДж/м^3 при н.у.), при пиролизе — проблема утилизации жидких побочных продуктов переработки.

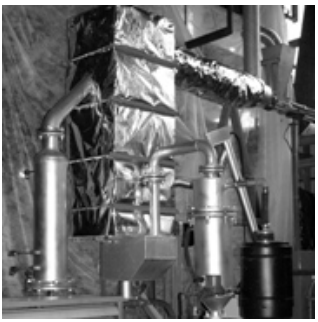


Рис. 1. Установка конверсии биомассы в энергетический газ (60 м^3/ч при н.у.)

В ОИВТ РАН была разработана технология двухстадийной переработки биомассы, продуктами которой являются синтез-газ и зола. На первой стадии проводится пиролиз с получением твердых, жидких и газообразных продуктов. На второй летучие продукты пиролиза продуваются через пористую углеродную среду при температуре 1000 ºС, где происходит их конверсия в водород и окись углерода. Основным достоинством является высокая степень энергетической конверсии биомассы. Количество образующихся газов — до 1,4 м^3 (н.у.) на один килограмм исходной биомассы, а теплота сгорания получаемого газа — около 11 МДж/м^3 (н.у.). В конечных продуктах переработки отсутствует жидкая фракция.

В настоящее время проводятся испытания опытной установки производительностью 60 м^3/ч (н.у.), которая позволяет производить выработку 50 кВт электрической и 0,086 Гкал/ч тепловой энергии при использовании газопоршневого когенерационного электроагрегата с КПД$_{эл}$ порядка 30 %.

Литература

1. **Зайченко В.М.** Получение высококалорийных газовых смесей из низкосортных твердых топлив // Труды конф. «Энергоэффективность». Краков, 2009. С. 128–132.

2. **Косов В.В.** Высококалорийная газовая смесь, получаемая при пиролизе древесины и торфа // Труды 17-й конференции по биомассе. Гамбург, 2009. С. 1085—1088.

А.С. Лопес Сааб, асп.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ВЕНЕСУЭЛЕ

В настоящее время использование солнечной энергии в мире развивается высокими темпами как в странах с высокоразвитой экономикой, так и в развивающихся странах.

Благодаря своему географическому расположению Венесуэла имеет значительный потенциал для освоения использования солнечной энергии. Среднегодовой приход радиации в Венесуэле составляет 5 кВт·ч/м^2, при этом на севере страны он достигает 6—7 кВт·ч/м^2. Кроме того, приход солнечной радиации достаточно стабилен в течение года.

В настоящее время по объему выбросов углекислого газа (CO_2) на одного человека в год Венесуэла существенно превосходит страны Латинской Америки [1].

В стране народное хозяйство потребляет в основном энергию, получаемую из органических видов топлива, окаменелостей и водных ресурсов. Исследования в области возобновляемой энергетики, проведенные учеными, показали, что с помощью фотоэлектрических электростанций уже сегодня можно реально планировать устойчивое обеспечение энергией. Использование солнечной энергии позволяет сократить ежегодное потребление органического топлива, что приведет к сокращению выбросов CO_2 и улучшение экологической обстановки в стране [2].

Литература

1. **E. Kuntsi-Reunanen.** A comparison of Latin American energy-related CO_2 emissions from 1970 to 2001 / Energy Policy. January 2007. Vol. 35. Issue 1. P. 586—596.

2. http://www.mppee.gob.ve/.

А.А. Моор, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВЭС В СУЩЕСТВУЮЩУЮ ЛОКАЛЬНУЮ ЭНЕРГОСИСТЕМУ ГОРОДА СЕВЕРО-КУРИЛЬСКА

В работе исследуется энергоэффективность внедрения ветроэлектростанции (ВЭС) в локальную энергосистему города Северо-Курильск (50°41' с.ш., 156°07' в.д.). Энергоснабжение потребителей города осуществляется дизельной электростанцией. Проведен анализ существующей локальной энергосистемы и состава потребителей, на основе которого смоделирован годовой график электрической нагрузки. Для анализа ветровых ресурсов в районе города выбрана метеостанция (МС) и аэрологическая метеостанция-аналог (АМС). Данные по ветровым ресурсам для МС и АМС-аналога получены из специализированных баз данных СБД «Погода России» и СБД «Вертикальный профиль ветра» [1]. Выбор площадки для размещения ВЭС осуществлялся с помощью ветрового атласа, построенного в программе WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) по данным СБД «Погода России». По данным МС-аналога за 11-летний ряд наблюдений выбран расчетный год. Моделирование скорости ветра с МС-аналога в точку расположения ВЭС осуществлялось путем учета открытости местности по классификации Милевского по восьми основным румбам [2]. По базе данных «Вертикальный профиль ветра» для АМС-аналога осуществлен пересчет скорости ветра на высоту башни ветроэлектрической установки (ВЭУ). По годовому ряду часовых значений скорости ветра на высоте башни для различных вариантов ВЭУ рассчитаны выработка электроэнергии и коэффициент использования установленной мощности $K_{и.у.м}$. Предварительный выбор ВЭУ осуществлялся в соответствии с ГОСТ Р 51991—2002. В результате технико-экономического обоснования выявлена целесообразность внедрения ВЭС в существующую локальную энергосистему. Оптимальный состав ВЭС, состоящий из двух ВЭУ Norwin TD 47 ASR 500 kW с высотой башни 50 м, позволит сократить годовую выработку электроэнергии ДЭС на 33 % и снизить расход топлива более чем на 28 %.

Литература

1. **Специализированная** база данных «Вертикальный профиль ветра» / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620870.

2. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова. М.: Издательство МЭИ, 2012.

А.Н. Морозов, студ.; рук. А.Е. Кондратьев, к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)

АНАЛИЗ НАИБОЛЕЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Двигатель Стирлинга, запатентованный в 1816 году, преобразует в работу любую разницу температур, для чего использует любые источники тепла и практически бесшумен при работе. Термодинамический КПД двигателя Стирлинга составляет 60 % и более от цикла Карно. В конструкции и работе двигателя Стирлинга отсутствуют элементы и процессы, которые могут загрязнить окружающую среду.

Основными источниками энергии для двигателей Стирлинга служат любые источники тепла с подходящей температурой, например сфокусированная солнечная энергия, любая тепловая энергия, ядерная энергия и т.п., но наиболее перспективным и доступным для двигателей Стирлинга может являться отбор тепла от горной породы, грунта и энергия солнца.

Отбор тепла от горной породы требует бурения скважины на достаточную глубину (100—200 метров) или нескольких таких скважин. В скважину опускается U-образный груз с двумя пластиковыми трубками, составляющими контур. Трубки заполняются теплоносителем, которым может быть 30 % раствор этилового спирта. Скважина заполняется грунтовыми водами естественным путем, и вода проводит тепло от камня к теплоносителю.

Для использования солнечной энергии в дополнении к двигателю Стирлинга необходимо иметь солнечный коллектор и концентратор. Сфокусированный поток энергии очень велик, поэтому достигаются высокие температуры, необходимые для работы теплового двигателя.

И.А. Первова, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛА ХОЭ НА БАЗЕ ВЕТРОДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Рассматривается выбор оборудования для электроснабжения села Хоэ, находящегося в Сахалинской области (51°19′15″ с. ш., 142°10′16″ в. д.), на базе ветродизельного комплекса, включающего в себя системы аккумулирования (АКБ).

В настоящее время электроснабжение с. Хоэ осуществляется за счет двух ДЭУ установленной мощностью 200 кВт, одна из которых находится в резерве.

Осуществлен расчет ветровых ресурсов с использованием СБД «Погода России» по данным МС(АМС)-аналога Александровск-Сахалинский.

Выбор площадки под размещение ВЭС осуществлялся с помощью региональной карты распределения средней скорости ветра (или удельной мощности ветра) в радиусе 5 км от объекта, построенной по многолетним данным МС-аналога на высоте 10 м с использованием программы Wasp. Моделирование скорости ветра с МС-аналога в точку расположения ВЭС осуществлялось по критерию Милевского по восьми основным румбам [1].

Моделирование скорости ветра на высоту башни осуществлялась по степенной зависимости с учетом внутригодового распределения коэффициента Хеллмана по данным АМС-аналога [2].

Предварительный выбор ВЭУ осуществлялся в соответствии с ГОСТ

Р 51991—2002 с учетом климатических факторов и критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ($K_{\text{и.у.м}}$).

В результате составления баланса активной мощности было выявлено, что использование АКБ нецелесообразно, поскольку при их существенной мощности доля их в перераспределении составляет менее 1 %.

В результате технического обоснования выявлена целесообразность внедрения ВЭУ в существующую локальную энергосистему, что позволит снизить на 25 % выработку ДЭУ при выборе ВЭУ в количестве двух агрегатов типов «Жаворонок» или WindPower с высотой башни 43 м.

Литература

1. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова // М.: Издательство МЭИ, 2012.

2. **Специализированная** база данных «Вертикальный профиль ветра» / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620870.

В.В. Писакин, студ.; рук. С.И. Краснов, к.ф.-м.н., с.н.с.
(КГЭУ, г. Казань)

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ МАЛЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОРОТОРОВ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Определение крутящего момента и мощности, развиваемой малыми ветророторами, можно проводить косвенным способом, используя в качестве тормозной нагрузки приводимые во вращение от вала—оси ротора гладкие диски, погружаемые в кювету с жидкостью. Расчетные формулы для поглощаемого вращающимся в неограниченном пространстве диском момента дают весьма точные результаты [1]. При вращении в кювете частота вращения ползет по мере приведения всей массы жидкости во вращение, но нетрудно выделить интервал времени, адекватный модельной ситуации стационарного течения в большом объеме. Рабочие частоты вращения сравниваемых роторов обычно находятся в достаточно узком диапазоне, как и развиваемые мощности, а соответственно и диаметры нагрузочных дисков. Для получения внешней характеристики ротора $N(\omega)$ оказывается достаточным набор дисков 4—5 диаметров, согласованный с вязкостью тормозящей жидкости. Также может быть построена зависимость КПД от числа быстроходности. В испытаниях регистрируются также минимальные скорости ветропотока, необходимые для самозапуска ротора, динамика выхода на режим максимальной мощности, максимальные обороты холостого хода. При отработке этой методики на самых малых моделях ветророторов с мощностями порядка милливатт использовались диски, вращающиеся в воздухе над ротором, с изолированием зоны вращения диска от ветропотока. Переход на более крупные модели привел к необходимости использовать воду или масло в кювете, помещаемой в районе нижнего конца оси ротора, хотя при этом добавилась проблема определения вязкости, сильно зависящей от температуры.

Описанная методика отрабатывается на специальном стенде, спроектированном для проведения испытаний серий моделей ветророторов типа Н-Дарье и модификаций роторов типа Савониуса в натуральном ветропотоке над водной поверхностью. Во всех испытаниях имел место ламинарный режим погранслоев на дисках.

Литература

1. **Дорфман А.Л.** Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М.: ГИФМЛ, 1960. — 260 с.

М.Е. Росендо Чакон, асп.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп.
(НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В БОЛИВАРИАНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ВЕНЕСУЭЛА НА БАЗЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Использование солнечной энергии является одним из весьма перспективных направлений энергетики, так как она обладает наибольшим потенциалом долгосрочного роста по сравнению с другими видами [2]. В Венесуэле среднедневной приход солнечной радиации составляет 5,5 кВт·ч/м^2 и практически не меняется в течение года, поэтому страна имеет все условия для эффективного использования солнечной энергии. Энергосистема Венесуэлы не охватывает удаленные регионы для обеспечения потребителей. В этих районах традиционно применяют автономные бензиновые или дизельные системы. Однако работа таких установок сопряжена со значительными материальными затратами на топливо, стоимость которого в последние годы достаточно устойчиво растет, трудностями в его доставке в отдаленные районы, а также наносимым негативным воздействием на окружающую среду. Например, в области Алта Гиагира 65 % жителей вообще не имеют обеспечения электроэнергий, около 13 % снабжаются об собственных генераторов, и только около 22 % подключены к электросети [1].

Солнечная энергетика является хорошим решением для обеспечения энергии автономных потребителей, поэтому правительство Венесуэлы заинтересовано в развитии солнечной энергетики и начинает заниматься этими вопросами, чтобы повысить уровень жизни отдаленных районов и сельских местностей.

Литература

1. **Ministry** of Popular Power Electrical Energy, Venezuela. http://www.corpoelec.gob.ve/

2. **Солнечная** энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 276 с.

Я.В. Самохин, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА

Анализ применения закона распределения Вейбулла в различных регионах России проводился по фактическим многолетним данным метеостанций (МС) с сайта «Погода России». Были проанализированы данные по 586 МС в 27 регионах России. Для всех рассмотренных точек определение параметра формы (γ) закона распределения Вейбулла определялось по формуле Гарцмана $\gamma = C_v^{-1,069}$, где C_v — коэффициент вариации, определенный по многолетнему ряду (10—12 лет) скоростей ветра [1]. Сопоставление фактических повторяемостей скорости ветра и теоретических по закону распределения Вейбулла проводилось в виде среднеквадратичного отклонения и относительной погрешности для каждого интервала градации. Расчеты доказали применимость распределения Вейбулла и формулы Гарцмана на всей рассмотренной территории. Также была проведена статистическая обработка полученных результатов и получены эмпирические зависимости параметра формы γ от среднемноголетней скорости ветра V_o (рис. 1) для 27 регионов. Полученные эмпирические зависимости имеют практическое значение при восстановлении повторяемости скорости ветра на рассматриваемой территории. Также была проведена попытка получить эмпирические зависимости с учетом фактора рельефа, местности (рис. 2).

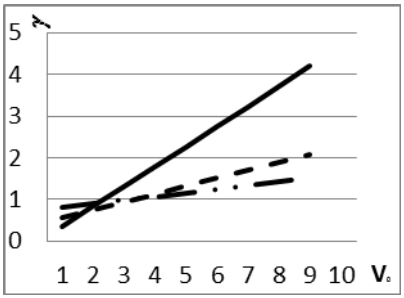


Рис. 1. Зависимость $\gamma(V_o)$ для отдельных регионов

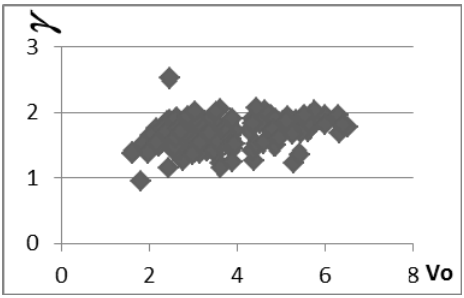


Рис. 2. Зависимость γ (V_o) для территорий с высотными отметками до 50 м

Литература

1. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова. М.: Издательство МЭИ, 2012.

В.Д. Трифонов, В.К. Ткачев, студенты; рук-ли К.В. Трубицын, ст. преп., С.В. Елфимов, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В БИОГАЗОВОЙ СИСТЕМЕ

Биогазовая система БГС-1, подробное описание и проектирование которой представлено авторами в предыдущих исследованиях, состоит из метантенка (реактора), газгольдера, систем загрузки и выгрузки, устройства смешения, выпускного газопровода, а также дополнительных элементов системы, предназначенных для хранения газа, производства тепла и т.д. Для наиболее эффективной ферментации БГС-1 дополняется устройствами теплообмена, в которых в качестве теплоносителя используется вода, подогретая до 50—60 °С [1].

В текущем исследовании авторы провели расчет выработанного при помощи солнечного коллектора необходимого количества энергии, предназначенной для сушки продуктов переработки биомассы после анаэробного сбраживания в метантенке. Между тем существующая схема биогазовой системы БГС-1 (рис. 1) была дополнена еще одним элементом — сушильной установкой *4* с применением солнечного коллектора *5*.

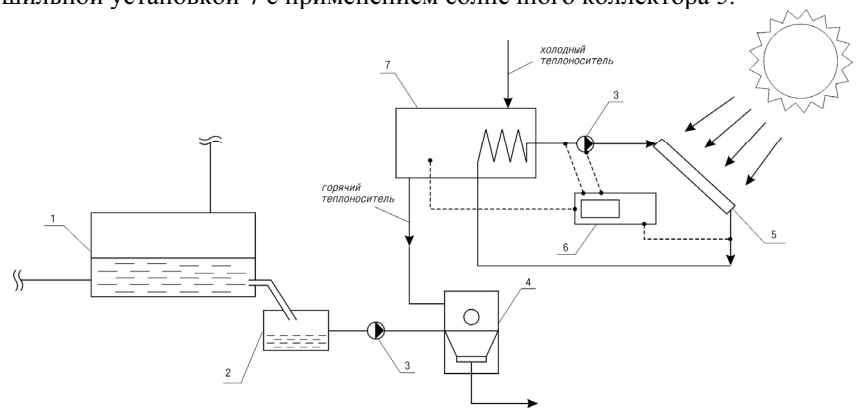


Рис. 1. Включение сушильной установки с применением солнечного коллектора в схему биогазовой системы БГС-1:
1 — метантенк (реактор); *2* — резервуар для продуктов переработки биомассы; *3* — насос; *4* — сушильная установка; *5* — солнечный коллектор; *6* — микропроцессор; *7* — теплообменник

Литература

1. **Ткачев В.К**. Проектирование биогазовой системы для предприятий сельского хозяйства Самарской области // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов Всерос. студ. олимпиады, научно-практ. конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т, 2012.

О.М. Умнова, асп.; рук. В.М. Зайченко, д.т.н., ст.н.с.
(ОИВТ РАН, Москва)

УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД С ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ

На территорию очистных сооружений ежедневно поступают сточные воды, вследствие чего происходит накопление осадка сточных вод (ОСВ), содержащего в себе кроме органики и песка различного рода примеси, представляющие опасность с экологической точки зрения, а именно: токсичные тяжелые металлы (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn и т.д.), кислоты, патогенную микрофлору. В результате испарения эти вещества загрязняют атмосферный воздух, а фильтрация их в почву приводит к загрязнению грунтовых вод и прилегающих водоемов [1].

На сегодняшний день основным способом утилизации ОСВ является его складирование на так называемых иловых картах. Объем осадка велик в виду его большой относительной влажности (96—98 %), а площадь иловых карт ограничена. Переполнение иловых карт приводит к экологической катастрофе прилегающих к очистным сооружениям районов и водоемов. В то же время в составе ОСВ содержится до 85 % (на сухое вещество) органических веществ, благодаря чему осадок после определенной обработки может быть использован в энергетических целях [1]. Для этого в данной работе предлагается использовать процесс термохимической конверсии ОСВ (низкотемпературный пиролиз) в газообразное топливо. Таким образом, будет решена не только проблема утилизации ОСВ, но и обеспечена экономическая целесообразность этого процесса [2].

Разработана принципиальная схема технологического процесса утилизации ОСВ с получением электрической и тепловой энергии. В обоснование этой схемы проведены исследования теплофизических свойств ОСВ. Для экспериментов использовались образцы ОСВ с домодедовских очистных сооружений. Исследования проводились на лабораторном стенде ОИВТ РАН, в состав которого входили термоанализатор, калориметрическая бомба, хроматограф. В ходе экспериментов были получены данные по составу пиролизных газов, теплоте сгорания ОСВ, массовой доле и температуре плавления зольного остатка.

Литература

1. **Жуков А.И., Монгайт И.П., Родзиллер И.Д.** Методы очистки производственных сточных вод: справочное пособие. М.: Стройиздат, 1977.

2. **Бессмертных А.В., Зайченко В.М.** Технологии конверсии биомассы. М.: ОИВТ РАН, 2009.

А.С. Харибина, асп.; рук. Р.В. Пугачев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА ПРИМЕРЕ АВТОНОМНОГО ДОМА

В современных дачных и коттеджных поселках для отопления дома часто используется электричество. Однако для отопления дома электричеством требуется большая выделенная мощность, а значительное потребление электроэнергии для производства тепла может вызвать перегрузку локальных сетей [1–4].

Решением данной проблемы может стать теплонасосная установка.

В данном исследовании поставлена задача определения технических характеристик системы теплоснабжения автономного дома.

Объектом исследования является загородный дом, предназначенный для постоянного проживания семьи из четырех человек.

Характеристики здания: строительный объем здания — 1460 м^3; общая площадь — 350 м^2; жилая площадь — 107,8 м^2; место строительства — Московская обл., г. Домодедово.

По результатам проведенного теплотехнического расчета получается, что для теплоснабжения индивидуального дома, удовлетворяющего нормативам, необходима тепловая нагрузка 14 кВт.

Для обеспечения этой тепловой нагрузки «традиционным» способом был подобран котельный агрегат Viessman Vitopend 100-W с номинальной тепловой мощностью 10,5—30 кВт, нормативным КПД ~90 %. Затраты на оборудование составят около 150 тыс. руб. Расход природного газа 14 тыс. м^3/год. Затраты на природный газ — 57 тыс. руб/год.

Для теплоснабжения дома за счет ТНУ был выбран тепловой насос «солевой раствор—вода» Stiebel Eltron WPF 20 теплопроизводительностью 20 кВт, потребляемой мощностью 7,8 кВт и коэффициентом мощности 2,6 кВт. Затраты на оборудование — 700 тыс. руб.

В результате анализа полученных результатов можно сделать вывод: хотя установка теплонасосной установки весьма дорогостоящая, затраты полностью окупаются за счет экономии затрат на природный газ. Срок окупаемости составляет около 10 лет.

Литература

1. **МДК 4-05.2004.** Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения. М.: Госстрой РФ, 2004.

2. **СНиП 23-01—99.** Строительная климатология.

3. **СНиП 41-01—2003.** Отопление, вентиляция и кондиционирование.

4. **СНиП 2.04.01-85*.** Внутренний водопровод и канализация зданий.

Чан Ньен Аунг Тан, асп.; рук-ли Р.В. Пугачев, к.т.н., доц., Н.К. Малинин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ В МЬЯНМЕ

В настоящее время в мире энергия малых водотоков, солнечной и ветровой энергии является наиболее распространенными видами НВИЭ для обеспечения электроэнергией автономного изолированного от сети потребителя (АП). По современным оценочным данным валовой ресурс солнечной и ветровой энергии Мьянмы соответственно составляет 1,14 млн ТВт·ч и 1,82 тыс. ТВт·ч (на высоте 10 м над уровнем моря) в год [1].

Известно, что в некоторых регионах, где имеются значительные ресурсы ветра или солнца, добавление к ДЭУ или БЭУ, СФЭУ или ВЭУ приводит к заметному снижению стоимости потребляемой АП энергии [1]. Кроме самого северного горного региона использование СЭ для обеспечения электроэнергии АП может считаться весьма перспективным. Для того чтобы найти экономически перспективное место совместного использования СЭ и ВЭ территория Мьянмы была районирована по ресурсам солнечной и ветровой энергии. Было установлено, что только в западной части Мьянмы можно использовать высокоэкономичную систему распределенной энергетики на основе солнечной и ветровой установок.

Для северных горных районов Мьянмы наиболее перспективным представляется создание систем распределенной энергетики на основе СЭ и малой гидроэнергетики (МГЭ). Здесь имеются значительные ресурсы малой гидроэнергетики и рассредоточенные вдоль малых рек многочисленные АП. Однако сегодня не существует современных качественных оценок ресурсов МГЭ Мьянмы. Для решения этой проблемы в работе использованы широкие возможности геоинформационных систем, которые позволили не только впервые оценить ресурсы МГЭ Мьянмы, но и рассмотреть перспективность их автономного или совместного использования с солнечными энергоустановками для энергообеспечения АП в северных горных районах страны.

Литература

1. **Зай Яр Мьинт, Виссарионов В.И.** Исследование целесообразности использования ветроэлектрической станции в Мьянме // Вестник МЭИ. 2013. № 1. 84—91 с.

Б.Т. Шохзода, студ.; рук. В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ С ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

В работе рассматривается энергообеспечение жилого дома, не подключенного к энергосистеме, за счет солнечной энергии. Объект находится на территории Республики Таджикистан в районе Джиликуль, где наблюдается хороший приход солнечной радиации. Схема электроснабжения основана на использование СФЭУ. При этом рассматривается использование как классических солнечных модулей (КСМ) на основе кремня, так и модулей с голографическими концентраторами. Для обеспечения горячего водоснабжения рассматриваются вакуумный и плоский солнечные коллекторы [1, 2].

Технология использования голографических солнечных концентраторов (ГСК) обеспечивает много положительных моментов для фотоэнергетики. При использовании этой технологии более чем на 60 % сокращается активная площадь приемника, отпадает необходимость ориентации приемника на Солнце [3]. Для условий безоблачного неба выходная мощность модуля с ГСК более чем на 50 % выше, чем у традиционного модуля, а для условий плохой освещенности — почти на 100 % выше. В связи с вышесказанным применение модулей с ГСК позволит повысить экономическую эффективность использования схем энергоснабжения на основе СФЭУ.

Литература

1. **Солнечная** энергетика, учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

2. **Расчет** ресурсов солнечной энергетики: учебное пособие / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательство МЭИ, 1998.

3. **Raymond K. Kostuk, Glenn Rosenberg.** Analysis and Design of Holographic Solar Concentrators // Electrical and Computer Engineering Department University of Arizona, Tucson, Arizona.

Секция 55

ЭЛЕКТРОФИЗИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Председатель секции — к.т.н., доцент Я.Л. Арцишевский
Секретарь секции — к.т.н., доцент А.В. Орлов

А.А. Абакаров, студ.; рук. Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГНИТОПРОВОДА

Токи включения силовых трансформаторов могут в несколько раз превышать их номинальный ток. Для современных трансформаторов характерны малые магнитные потери, и пусковые токи приближаются по значению к токам короткого замыкания. Броски токов включения приводят к ложным срабатываниям релейной защиты и тяжелым электродинамическим воздействиям на обмотки. В настоящее время разрабатывается ряд мероприятий по ограничению токов включения, таких как управляемая коммутация, применение предвключаемых резисторов в выключателе, коммутация трансформатора разъединителем, размагничивание магнитопровода перед включением. Сопоставление эффективности указанных мероприятий целесообразно делать с помощью численного моделирования, что позволит провести анализ большого числа влияющих факторов при минимальных затратах.

В универсальном программном обеспечении для расчета переходных процессов отсутствуют модели трансформаторов, позволяющие выполнить корректный расчет пусковых режимов. Ранее авторами была реализована расчетная модель силового трансформатора, основанная на электрической схеме замещения, полученной по принципу дуальности из схемы магнитной цепи [1]. В настоящей работе расчетная модель усовершенствована путем детального учета строения магнитной системы. Учтено увеличение намагничивающей мощности и потерь в углах и стыках магнитной системы, тип стыка, схема шихтовки, марка электротехнической стали, технологические аспекты сборки магнитопровода.

Внесенные уточнения позволили получить лучшее совпадение результатов расчета с экспериментом. Полученная модель позволяет обоснованно выбирать метод ограничения токов включения при проектировании

пусковых схем, а также полезна при численном моделировании целого комплекса других задач, таких как ограничение геомагнитно индуцированных токов, протекающих в обмотках трансформаторов, ограничение феррорезонансных перенапряжений и других квазистационарных перенапряжений.

Литература

1. **Абакаров А.А., Ларин В.С.** Разработка модели силового автотрансформатора для расчета пусковых токов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сборник докладов XIX Международной научно-технической конф. студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. Т. 4.

А.Х. Абдрахманов, А.Ф. Шарифуллин, студенты; рук-ли
Э.Ф. Хакимзянов, ст. преп.; Р.Г. Исаков, к.т.н., преп. (КГЭУ, г. Казань)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ В СЕТЯХ С МАЛЫМИ ТОКАМИ НА ЗЕМЛЮ

В сетях электроснабжения крупного промышленного предприятия можно выделить ряд проблем, затрудняющих организацию системы релейной защиты [1]:

- затруднение применения токовой отсечки (ТО) на отходящих линиях малой протяженности;
- увеличение времени срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ).

В случае недостаточной чувствительности, быстродействия и селективности токовых защит ПУЭ допускает применение дистанционной защиты (ДЗ) в простейшем исполнении.

Особенностью применения дистанционных защит (ДЗ) в распределительных сетях 6—35 кВ заключается в том, что этот вид защиты не имеет практического применения в сетях с малыми токами на землю. Измерительные органы сопротивления (ИОС) в сетях с малым током замыкания на землю должны выполняться в соответствии с основными требованиями к ИОС ДЗ защиты линий напряжением 110–330 кВ [2].

При выполнении ДЗ в распределительных сетях с малыми токами замыкания на землю следует обратить внимание на тот факт, что защита должна реагировать не только на междуфазные короткие замыкания, но и на двойные замыкания на землю с отключением одного из мест повреждения [3]. В таких сетях одной из главных проблем является организация селективной защиты от замыканий на землю с требуемой чувствительностью.

Целью работы является анализ поведения измерительных органов сопротивления при их использовании в сетях с малыми токами замыкания на землю. Для этого в программной среде MatLab Simulink смоделирована схема распределительной сети 10 кВ, состоящая из одной питающей и двух отходящих ЛЭП. Последовательно имитируются замыкания на землю в одной и двух точках сети. Анализируются поведения ИОС фазного и междуфазного контуров ДЗ, установленных на каждой линии.

Литература

1. **Исаков Р.Г., Гарке В.Г.** Концепция развития релейной защиты системы электроснабжения крупного промышленного предприятия // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 7—8. С. 46—54.

2. **Циглер Г.** Цифровая дистанционная защита: принципы и применение: пер. с англ. / под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. — 322 с.

3. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энероатомиздат, 2007. — 549 с.

А.А. Аникин, студ.; рук-ли Р.К. Борисов, к.т.н., в.н.с., Д.А. Козлов, асс. (НИУ «МЭИ»), А.В. Склонин, к.т.н. (ЦНИИХМ)

ИМИТАТОР РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА С ЧЕЛОВЕКА С ПОВЫШЕННЫМИ УРОВНЯМИ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В данной статье описывается имитатор разрядов статического электричества с человека, предназначенный для испытаний опасных изделий на помехоустойчивость с подтверждением уровня электромагнитной безопасности.

В ряде случаев при создании новых образцов изделий для обеспечения их электромагнитной безопасности при воздействии разрядов статического электричества с человека, необходимо знать значения следующих показателей:

- уровня помехоустойчивости медицинской аппаратуры к воздействию разрядного напряжения до 35 кВ [1] и выше;
- минимальной импульсной энергии зажигания отдельных веществ и материалов;
- удельной энергии импульса воспламенения пиротехнических изделий [2].

Значения вышеуказанных показателей для отдельных изделий не определены, а соответствующие имитаторы разрядов статического электричества характеризуются уровнем воздействия не более 30 кВ [3, 4].

Основные характеристики разработанного имитатора:

- разрядное напряжение до 70 кВ (имеется возможность подключения разрядной емкости 140 или 250 пФ и разрядного сопротивления 330 или 500 Ом);
- длительность фронта импульса тока по уровню 0,1—0,9 относительно максимума амплитуды не более 1 нс;
- удельная энергия импульса тока не менее $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ $А^2/с$.

Для измерений параметров импульса тока разработан измерительный тракт с учетом требований ГОСТ Р 51317.4.2—2010.

Литература

1. **ГОСТ Р 50267.0.2—2005.** (МЭК 60601-1-2:2001). Изделия медицинские электрические. Ч. 1–2. Общие требования безопасности. Электромагнитная совместимость. Требования и методы испытаний.

2. **ТР ТС 006/2011**. Технический регламент «О безопасности пиротехнических составов и содержащих их изделий». 2011.

3. **Генераторы** электростатического разряда. http://www.emci.ru/testg3.shtml.

4. **ГОСТ Р 51317.4.2—2010** (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.

О.С. Белова, асп.; рук. А.Г. Темников, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ИСКУССТВЕННЫХ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

Системы пеленгации молнии, предназначенные для определения места удара молнии в землю и параметров тока молнии, работают на основе регистрации электромагнитного излучения разряда молнии. Одной из характерных для них проблем является разделение внутриоблачных разрядов и разрядов типа «облако — земля». Предполагается, что внутриоблачные разряды имеют в своем спектре более высокие частоты, однако вопрос о выборе пороговой частоты до сих пор не решен. Это приводит к существенным ошибкам в определении места удара молнии и параметров разряда молнии. Установление связей между параметрами и спектральными характеристиками импульсов токов разрядов и импульсов их электромагнитного излучения остается актуальной проблемой.

Использование искусственных грозовых облаков, способных инициировать разряды внутри облаков и между облаком и землей, дает возможность существенно продвинуться в решении данной проблемы [1]. В докладе представляются результаты анализа характеристик разрядов из искусственного грозового облака и создаваемого ими в ближней зоне электромагнитного излучения (тока смещения). При обработке экспериментальных данных применялся вейвлет-анализ (вейвлеты «Мексиканская шляпа» и «Морле»). В этом случае сигнал одновременно анализировался в частотной и во временной областях.

Анализ спектральных характеристик импульса тока главной стадии разряда показал, что ей соответствует характерный частотный диапазон от 8 до 18 МГц (максимальная частота 33 МГц). Но вызванное им электромагнитное излучение характеризовалось более высокими частотами в диапазоне от 20 до 54 МГц (максимальная частота 100 МГц). Максимальные интенсивности в спектральном составе сигналов соответствовали временам фронта и максимума импульса тока.

Была выявлена явная корреляция между следующими параметрами: максимальным током смещения и крутизной импульса тока разряда, крутизной импульса тока разрядов и максимальными частотами на фронте импульса тока разряда, максимальным током смещения и максимальной частотой электромагнитного излучения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-01000-а).

Литература

1. **Исследование** характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей / А.Г. Темников, А.В. Орлов, В.Н. Болотов, Ю.В. Ткач // ЖТФ. 2005. Т.75. № 7.

Т.Ю. Винокурова, асп., рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)

ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТОКЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ СЕТЕЙ 6–10 кВ НА УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Условия применимости максимальной токовой защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), реагирующей на общий уровень высших гармоник (ВГ) в токе $3I_0$, определяется соотношением:

$$I_{c\,i*} = \frac{I_{c\,i}}{I_{c\Sigma}} \le \frac{1}{1 + \alpha_{макс} K_{отс} K_{ч.мин.доп} / \alpha_{мин}} = \frac{1}{1 + Z\,K_{отс} K_{ч.мин.доп}}, \qquad (1)$$

где $I_{c\,i}$ — собственный емкостный ток i-го присоединения; $I_{c\Sigma}$ — суммарный емкостный ток сети; $\alpha_{макс}$, $\alpha_{мин}$ — максимально и минимально возможные уровни ВГ в $I_{c\,i}$; $K_{отс}$ — коэффициент отстройки; $K_{ч.мин.доп}$ — минимально допустимый коэффициент чувствительности; $Z = \alpha_{макс} / \alpha_{мин}$ — коэффициент, характеризующий нестабильность общего уровня ВГ в токе ОЗЗ.

Из выражения (1) можно видеть, что условия применимости токовой защиты на основе ВГ в основном определяются параметром Z, максимальные значения которого по существующим оценкам находятся в пределах 3 — 4.

Наибольшим колебаниям общий уровень ВГ подвержен в сетях 6 — 10 кВ систем электроснабжения предприятий, работающих в сменах, на которых при ночном спаде нагрузки или в выходные дни все основные технологические установки и соответственно основные источники ВГ — различного рода нелинейные преобразователи (НП) могут практически полностью отключаться. При отключении НП основным источником ВГ являются силовые трансформаторы, определяющие минимальный уровень гармоник в токе ОЗЗ. Для предприятий с указанным графиком работы получено упрощенное соотношение, определяющее максимальное значение параметра Z_ν для ν-й гармоники:

$$Z_\nu = \frac{\alpha_{\nu\Sigma\,макс}}{\alpha_{\nu\Sigma\,мин}} = \frac{I_{х.х*}\alpha^{(Т)}_{\nu\,макс} + \alpha^{(НП)}_{\nu\,макс} K^{(Т)}_{з} S^{(НП)}_{*макс}}{I_{х.х*}\,\alpha^{(Т)}_{\nu\,мин}}, \qquad (2)$$

где $\alpha^{(Т)}_{\nu\,макс}$, $\alpha^{(Т)}_{\nu\,мин}$ — максимальный и минимальный уровни ν-й гармоники, генерируемые трансформаторами, о.е.; $\alpha^{(НП)}_{\nu\,макс}$, $\alpha^{(НП)}_{\nu\,мин}$ — максимальный и минимальный уровни ν-й гармоники, генерируемые НП, о.е.; $I_{х.х*}$ — ток холостого хода трансформатора, о.е.; $K^{(Т)}_{з}$ — коэффициент

загрузки трансформаторов; $S_{*\text{макс}}^{(\text{НП})}$ — максимальная мощность НП, отнесенная к мощности трансформаторов.

Расчеты по формуле (2) показали, что в кабельных сетях 6–10 кВ, питающих предприятия с указанным суточным графиком работы, максимальные значения параметра Z, указанные в выражении (1), могут достигать 20 и более, что делает практически невозможным применение токовых защит абсолютного замера ВГ.

К.С. Горбунов, Д.И. Скворцов, студенты, С.В. Гундарева, асп.; рук-ли А.Г. Темников, к.т.н., доц.; И.Е. Калугина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ДЛИНЫ СТУПЕНИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НИСХОДЩЕГО ЛИДЕРА МОЛНИИ

Выявлению физической картины распространения отрицательной нисходящей молнии и построению на ее основе физико-математической модели в настоящее время уделяется большое внимание в связи с возросшими требованиями к методам расчета молниезащиты наземных объектов. Еще в 30-е годы прошлого столетия был установлен дискретный характер удлинения отрицательного лидера молнии, который был назван ступенчатым. По регистрациям серии наблюдений средняя пауза между ступенями близка к 60 мкс при разбросе измеренных значений от 30 до 100 мкс, время формирования ступени не превышает 1 мкс, а ее длина варьируется в пределах 10 — 200 м при среднем значении 30 м.

Установлено, что новая ступень отрицательного лидера формируется на границе стримерной зоны из объемного плазменного ядра. Это позволяет оценивать длину ступени как длину стримерной зоны, средняя напряженность электрического поля в которой по экспериментальным данным составляет 8—13 кВ/см. В докладе представляются результаты расчета распределения напряженности электрического поля вблизи головки нисходящего лидера в зависимости от заряда лидерного канала. В качестве базовой модели выбрана модель распределения заряда вдоль лидерного канала [1], которая учитывает изменение распределения плотности заряда по каналу лидера по мере приближения лидера к земле. На основании расчетов поля выполнены оценки длины ступеней для разных токов молнии и при разных высотах головки лидера над землей. Установлено, что длина ступени увеличивается с увеличением тока молнии и с приближением лидера к земле. Например, при токе молнии 60 кА при высоте головки над землей 500 м длина ступени составляет 30 м, а при 100 м — 64,2 м.

Полученные результаты будут в дальнейшем использованы на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» при развитии методики расчета, использующей вероятностный подход в оценках молниезащищенности наземных объектов [2].

Литература

1. **Cooray V.** Lightning Protection (Power and Energy series) // The Institution of Engineering and Technology, 2009.

2. **Развитие** вероятностной методики для оценки поражаемости молнией сосредоточенных объектов / И.Е. Калугина, А.Г. Темников, А.А. Белогловский, С.В. Гундарева // Вестник МЭИ. 2012. № 2.

С.В. Гундарева, асп.; рук-ли А.Г. Темников, к.т.н., доц., И.Е. Калугина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОРАЖЕНИЯ МОЛНИЕЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Решение проблемы активного управления процессами возникновения молнии, ее ориентировки и выбора ею места удара является актуальным в связи с возросшими требованиями к молниезащите объектов. На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» развивается методика расчета, основанная на вероятностном подходе в оценках молниезащищенности объектов [1].

Большое внимание уделяется моделированию обоснованного критерия возникновения и развития восходящего разряда с наземного объекта, учитывающего все факторы, сопутствующие процессу поражения молнией наземных объектов. Развивается критерий возникновения восходящего лидера с объекта [2]. Он основан на расчете заряда *Qcor*, протекшего через основание вспышки стримерной короны. Предложено учитывать вероятностный характер перехода стримера в лидер при достижении определенного значения *Qcor*, объясняемый случайным характером формирования самой импульсной стримерной короны, возможной конкуренцией нескольких стримерных вспышек и другими факторами.

На основе анализа возможных распределений плотности заряда по каналу лидера молнии построена модель нисходящего лидера, движение которого к земле главным образом обуславливает изменение электрического поля у защищаемого объекта в грозовых условиях. Модель лидера молнии также учитывает ступенчатый характер его продвижения, возможность подхода лидера молнии с разных сторон и под разными углами к объекту, вероятностный характер параметров разряда молнии.

Разработанная на основе моделирования процесса поражения молнией наземных объектов методика реализуется для объектов, специфика которых отражается трехмерным моделированием объекта с учетом конструктивных особенностей его элементов, системы молниезащиты, соседних объектов, а также состава взрывоопасной среды, размеров и расположения взрывоопасной области в случае взрывоопасных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.132.21.1803; проект № 7.5072.2011).

Литература

1. **Развитие** вероятностной методики для оценки поражаемости молнией сосредоточенных объектов / И.Е. Калугина, А.Г. Темников, А.А. Белогловский, С.В. Гундарева // Вестник МЭИ. 2012. № 2.

2. **Becerra M. and Cooray V.** A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception // IEEE Trans. Power Del. 2006. Vol. 21. No 2.

А.А. Ефремов, студ.; рук-ли Р.К. Борисов, к.т.н., в.н.с., Д.А. Козлов, асс. (НИУ «МЭИ»)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, УСТАНАВЛИВАЕМЫХ НА ВЛ

Для систем релейной защиты и автоматики (РЗА) разрабатываются и внедряются новые устройства, устанавливаемые на проводах воздушных линий (ВЛ) и шинах распределительных устройств (РУ). К ним относятся индикаторы коротких замыканий, устройства обнаружения мест повреждения, устройства релейной защиты в «мертвой зоне», датчики обледенения проводов и измерительные датчики цифровых оптических трансформаторов тока и напряжения.

Устройства, устанавливаемые в электрических сетях, испытываются на устойчивость к электромагнитным воздействиям по стандартам, требования которых не учитывают всех особенностей реальной электромагнитной обстановки. На устройства воздействуют магнитные поля промышленной частоты в нормальном и аварийном режимах, на порядки превышающие испытательные воздействия, нормированные в действующих ГОСТ по электромагнитной совместимости; импульсные высокочастотные электромагнитные поля, возникающие при переходных процессах в первичных цепях и ударах молнии в ВЛ; помехи от коронных разрядов [1—2].

В этой связи актуальной является разработка универсального комплекса, позволяющего проводить комбинированные испытания устройств такого типа на электромагнитную совместимость. Комплекс должен создавать в условиях испытательной лаборатории электромагнитные воздействия, эквивалентные реальным, возникающим при эксплуатации устройств. Для этого была проанализирована электромагнитная обстановка в местах установки устройств, проведена расчетная оценка возможности создания подобных воздействий в лабораторных условиях.

В дальнейшем необходимо разработать методику испытаний устройств РЗА, устанавливаемых на проводах ВЛ и шинах ОРУ, на электромагнитную совместимость. Испытательный комплекс позволит проводить испытания в соответствии с методикой устройств РЗА, как уже применяемых в электрических сетях, так и вновь разрабатываемых.

Литература

1. **Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Темников А.Г.** ЭМС и молниезащита в электроэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

2. **ГОСТ Р 51317.6.5.** (МЭК 61000.6.5) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.

Е.С. Зайцев, асп.; рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Пропускная способность кабельных линий зависит от большого количества параметров, которые на стадии проектирования все целиком учесть сложно. В результате на практике кабельная линия может работать в режиме перегрузки либо с большим запасом по допустимому току.

На сегодняшний день эту проблему пытаются решить с помощью оптоволоконных средств мониторинга распределенной температуры в режиме реального времени, которые позволяют определять температурный профиль кабелей как функцию времени [1].

Но так как оптоволоконный датчик можно разместить только на поверхности кабеля либо в экране, то невозможно получить температуру наиболее нагретых слоев изоляции вблизи жилы [2]. Поэтому средства мониторинга распределенной температуры хоть и решают некоторые задачи контроля состояния КЛ, но они не позволяют получить исчерпывающую и достоверную информацию о текущей пропускной способности и загруженности кабелей.

Таким образом, существует задача создания системы мониторинга пропускной способности кабелей, в которой будет внедрен математический аппарат, позволяющий в режиме реального времени рассчитывать температуру жилы и оценивать текущую реальную пропускную способность кабелей.

Одной из составляющих этой задачи является определение тепловыделения в токоведущих частях кабелей. Как известно, здесь имеет существенное влияние смещение токов за счет поверхностного эффекта и эффекта близости.

С этой целью был выполнен расчет электромагнитного поля коаксиального однофазного бронированного кабеля марки HXLMKCJ-W 1×2000 330кВ. Расчет проведен на основе аналитического решения уравнений электромагнитного поля по методике, изложенной в [2], а также численного (методом конечных элементов) решения в программе COMSOL Muitiphysics.

Литература

1. **Мониторинг** силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев, Н.В. Кривошеев, В.К. Маршнер // Электро. 2008. № 5. С. 38—40.

2. **Осика Л.К.** Способы учета изменения температуры по трассам линий электропередачи для уточнения их математических моделей // Электро. 2006. № 6. С. 27—30.

А.С. Зимин, студ.; рук-ли А.Г. Темников, к.т.н., доц.,
Л.Л. Черненский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ОБЛАКА ЗАРЯЖЕННОГО АЭРОЗОЛЯ

Использующиеся в нормативных документах статистические характеристики тока молнии определены по относительно небольшому объему данных прямых измерений в основном в горных условиях. Данные, полученные на основе дистанционных измерений параметров разряда молнии, не являются надежными и практически не позволяют установить корреляционные соотношения между параметрами. Помимо этого необходимо учитывать, что параметры разряда молнии, поражающей летательные аппараты, могут существенно отличаться от тех, что характерны для молний «облако — земля».

Использование искусственных грозовых облаков позволяет получать и исследовать весь спектр грозовых разрядных явлений вплоть до лидерной и главной стадии, набирать статистически значимый объем экспериментальных данных. В докладе представлены результаты обработки экспериментальных данных (осциллограмм тока), полученных для промежутка «модель молниеотвода на внешней поверхности модели диэлектрического обтекателя — искусственное грозовое облако».

Эксперименты показали, что импульс тока главной стадии разряда имеет две характерные формы: однопиковую и двухпиковую. Первый пик в импульсе тока второй формы характеризовался большими значениями крутизны импульса тока (до 80—100 кА/мкс). Это может быть связано с участием в формировании главной стадии разряда заряда, накопившегося на внешней поверхности модели диэлектрического обтекателя. Вторые пики в импульсах второй формы имели параметры, близкие к параметрам импульсов тока однопикового характера.

В специально созданной программе была выполнена статистическая обработка данных по параметрам главной стадии разряда для 230 экспериментальных осциллограмм импульсов тока. Кумулятивное распределение амплитуд тока главной стадии разряда из искусственного грозового облака по характеру близко к распределению, предложенному в СИГРЭ. В то же время при крутизне импульса более 40 кА/мкс, кумулятивное распределение крутизны импульса тока главной стадии практически совпадает с распределением, предложенным в [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-01000-а).

Литература

1. **Berger K., Anderson R.B., Kroninger H.** Parameters of lightning flashes // Electra. 1975. V. 41.

Д.Г. Исаков, студ.; рук. Р.Г. Исаков, к.т.н., преп. (КГЭУ, г. Казань)

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С НИЗКООМНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

В мировой практике эксплуатации сетей среднего напряжения давно используется режим заземления через резистор. Данный режим заземления нейтрали для России новый и мало используется в сетях 6–35 кВ.

Преимущества заземления нейтрали через низкоомный резистор по сравнению с изолированной нейтралью [1]:

- отсутствие дуговых перенапряжений высокой кратности и многоместных повреждений в сети;
- исключение феррорезонансных процессов и повреждений трансформаторов напряжения;
- практически полное исключение возможности перехода однофазного замыкания в многофазное;
- простое выполнение чувствительной и селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю.

Сопротивление резистора выбирают наименьшим исходя из двух условий [2]:

- резистор должен создавать ток не менее емкостного тока ОЗЗ;
- обеспечение селективного срабатывания защит на отключение ОЗЗ.

На данный момент в России низкоомное заземление нейтрали начинается только применяться, а следовательно, возникают вопросы по выбору параметров срабатывания защиты от замыкания на землю.

Моделирование сети с низкоомным заземлением нейтрали в среде Matlab Simulink позволит выполнить анализ переходных процессов при замыканиях на землю. Полученная компьютерная модель поможет в исследовании работы токовых защит при однофазных замыканиях на землю, что позволит дать рекомендации для расчетов параметров срабатывания при проектировании сетей с низкоомным заземлением нейтрали.

Литература

1. **Титенков С.С.** Четыре режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона // Новости электротехники. 2003. № 5(23).

2. **Методические** указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 и 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО «ГАЗПРОМ». СТО ГАЗПРОМ 2-1.11-070—2006.

Д.В. Кириллов, студ.; рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В диэлектриках развитие электрического разряда определяется значениями и распределением напряженности электрического поля. Варьируя форму электродов, добавляя экраны, можно изменить разрядные характеристики межэлектродного промежутка. Такая деятельность называется регулированием полей [1],а их численный расчет — ее составной частью.

Широко применяются четыре метода расчета [1] (конечных разностей (МКР), эквивалентных зарядов (МЭЗ), интегральных уравнений, конечных элементов), отличающихся соотношением точности и времени счета. Здесь представлены результаты сопоставления МЭЗ [1] и МКР [2] на характерном примере системы «стержень на плоскости против плоскости» (рис. 1).

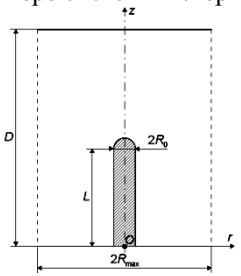


Рис. 1. Система электродов «стержень на плоскости против плоскости»

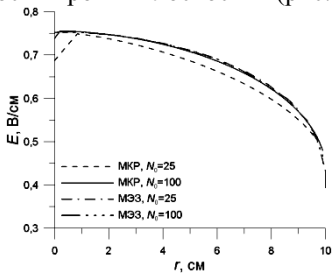


Рис. 2. Расчетные распределения $E(r)$ по закругленной поверхности стержня

На рис. 2 показаны результаты расчета напряженности поля E на закруглении стержня при $D = R_{\max} = 100$ см, $L = 0{,}4D$, $R_0 = 0{,}1D$, $U = 10$ В. Дискретизация задачи определяется числом N_0 эквивалентных зарядов в МЭЗ и узлов сетки в МКР на закруглении. Их число на других поверхностях $\sim N_0$ с коэффициентом, равным отношению длин поверхности и закругления.

При $N_0 = 100$, дающем высокую точность при большом времени счета, результаты по МЭЗ и МКР отличаются на ≈1 % (рис. 2). При $N = 25$, позволяющем сократить время счета в ≈ 8 раз, результаты расчета по МЭЗ изменяются мало, а погрешности МКР возрастают до 7÷10 %.

Таким образом, при грубой дискретизации расчетной области МКР дает большие, чем МЭЗ, погрешности значений E вблизи электродов. Это затрудняет применение МКР при расчете полей сложной конфигурации.

Литература

1. **Расчет** электрических полей устройств высокого напряжения / И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

2. **Павленко А.М., Белогловский А.А.** Об экономичной методике расчета электрических полей с объемным зарядом // Электричество. 2009. № 5.

С.М. Ковалев, студ., А.В. Лазукин, асп.;
рук. С.А. Кривов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Генераторы импульсов наносекундной длительности широко применяются в лазерной и ускорительной технике, в высоковольтных технологиях и других областях науки и техники. Перспективной областью применения данных генераторов является производство озона при диэлектрическом барьерном разряде.

Существует два основных принципа конструирования генераторов наносекундных импульсов высокого напряжения на основе быстродействующих коммутаторов и малоиндуктивных накопителях и обостряющих разрядниках [1].

После проведения анализа известных схем и конструкций была выбрана схема генератора с одиночной формирующей линией. При выборе учитывались такие факторы, как простота и компактность.

Проведены исследования влияния параметров узлов генератора на получаемые импульсы. Для конструирования макета на напряжение до 7 кВ были использованы коаксиальные линии длинной 5 и 10 м из кабеля марки РК-50-7-21 с фторопластовой изоляцией, которые позволили получать импульсы длительностью 25 и 50 нс соответственно. Формирующая линия для компактности была изготовлена в виде коаксиальной системы на полом диэлектрическом цилиндре диаметром 12 см. В качестве коммутатора были использованы шаровые разрядники диаметром 6 см. Использование одного из шаровых разрядников с третьим поджигающим электродом позволяет получать импульсы с частотой повторения от 20 до 60 Гц.

Данный генератор планируется использовать для исследования диэлектрического барьерного разряда.

Литература

1. **Месяц Г.А**. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.

А.В. Лазукин (НИУ «МЭИ»), В.А. Михалевский (ИПЛИТ РАН, г. Шатура), аспиранты; рук-ли О.А. Новодворский, д.ф.-м.н., с.н.с. (ИПЛИТ РАН, г. Шатура); С.А. Кривов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В РАЗЛИЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ ЗОНЫ ПЛАЗМЫ

В настоящее время много внимания уделяется применению плазмы поверхностного диэлектрического барьерного разряда в электротехнологиях, связанных с разрушением органических загрязнений в газах и жидкостях [1]. Одним из важных факторов воздействия поверхностного разряда на загрязняющие агенты является УФ-излучение.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований спектра поверхностного разряда на керамике ВК-94 в различных сечениях зоны плазмы, удаленных от полосового электрода на расстояние до 5 мм. Во всех экспериментах к электроду было приложено синусоидальное напряжение 2,2 кВ, 14 кГц. Полученные спектры приведены на рис. 1. Наибольшая интенсивность УФ-излучения наблюдается на расстоянии 2 мм от электрода. Над поверхностью электрода и на значительном удалении от него интенсивность спектральных линий падает в 3—4 раза.

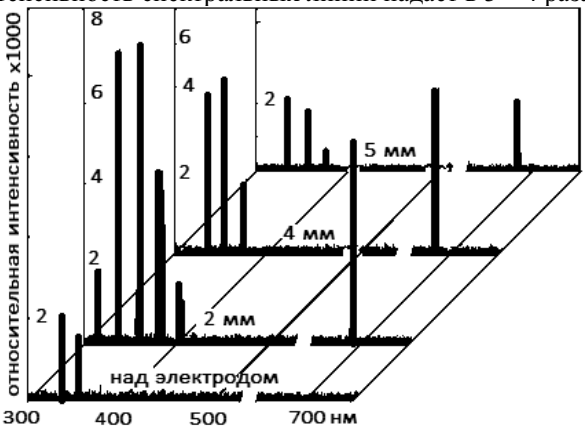


Рис. 1. Спектр поверхностного диэлектрического барьерного разряда, полученный по различным сечениям зоны плазмы

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8391 от 24 августа 2012 года.

Литература

1. **Соколова М.В., Кривов С.А.** Электрофизические процессы в газовой изоляции. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

А.В. Миналиев, студ.; рук. Ю.В. Писковацкий, доц. (КГЭУ, г. Казань)

ДАТЧИК ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Воздушные линии электропередачи являются наименее надежными элементами современной энергосистемы.

Гололедные образования оказывают огромную механическую нагрузку на воздушные линии, что может привести к обрыву проводов, а также к поломке опор линий электропередачи [1].

Предлагаемый способ обнаружения гололедных отложений на проводах линий электропередачи позволяет определить конкретный участок провода воздушной линии электропередачи, на котором произошло образование гололеда.

ВЧ-сигнал, распространяющийся по ЛЭП, претерпевает определенные изменения. При наличии на ней гололедных отложений возникает увеличение затухания высокочастотного сигнала [2]. Это затухание контролируется специальными датчиками, расположенными на опорах воздушной линии. Учитывая длину провода между двумя датчиками, определяется увеличение этого затухания, а также толщина гололедной муфты на данном участке. Значение, измеренной с помощью датчика амплитуды высокочастотного сигнала, передается посредством беспроводной связи на приемный пункт, где проводится расчет затухания α высокочастотного сигнала на каждом из участков, который равен отношению модулей амплитуды высокочастотного сигнала в начале участка $U_{нач}$ и в конце участка $U_{кон}$: $\alpha = 20\lg(U_{нач}/U_{кон})$, где величина α измеряется в децибелах.

Датчик представляет собой высокочастотное емкостное устройство, первичной обкладкой которого является провод линии электропередачи, а вторичной — антенна электрического поля, представляющая собой металлический проводник, расположенный на максимально близком безопасном расстоянии к проводам линии. Антенна через индуктивность заземлена на опору. Конденсатор, образуемый проводом линии электропередачи и антенной, и индуктивность образуют фильтр верхних частот, эффективно пропускающий высокие частоты, на которых работает данный метод, и не пропускающий промышленную частоту.

Литература

1. **Дьяков А.Ф.** Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987. — 160 с.

2. **Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С.** Высокочастотная связь по линиям электропередачи. М.: Энергия, 1977. — 489 с.

В.В. Можжухина, асп.; рук. Л.М. Колесов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ К КОРОТКИМ ЗАМЫКАНИЯМ ЗА ТРАНСФОРМАТОРАМИ ОТВЕТВЛЕНИЙ

Рассматривается специальное выполнение дистанционной защиты линий с ответвлениями напряжением 110—220 кВ [1], на которых в качестве основной защиты используется продольная дифференциальная токовая защита (ДЗЛ).

В каждом из терминалов ДЗЛ имеется информация о токе через защиту, токе противоположного конца линий, их сумма, а также напряжение на шинах в месте установки защиты.

Предлагается выполнить дополнительное виртуальное реле сопротивления, включаемое на междуфазное напряжение в месте ответвления и ток в ответвлении и предназначенное для срабатывания при коротком замыкании (КЗ) за трансформатором ответвления.

Для получения напряжения в месте ответвления используется напряжение на шинах, компенсированное падением напряжения от тока на сопротивлении участка линии до ответвления. Ток в ответвлении определяется как сумма токов по концам линии.

При КЗ на ответвлении виртуальное реле оказывается как бы включенным в сеть с односторонним питанием, где отсутствует влияние подпитки от противоположной системы, загрубляющее защиту.

При трехфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток «звезда — треугольник» замер сопротивления оказывается равным действительному сопротивлению до места КЗ. При двухфазном КЗ за трансформатором замер искажается [2], но влияние подпитки все равно устраняется. Поэтому чувствительность предлагаемой защиты оказывается значительно выше существующей.

Кроме того, для обеспечения несрабатывания в режимах без КЗ достаточно обеспечить отстройку от тока нагрузки только трансформатора ответвления, а не от перетока мощности по линии, что значительно улучшает отстроенность от нагрузочных режимов.

Литература

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976.

2.**Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 7: Дистанционная защита линий 35—330 кВ. М.: Энергия, 1966.

А.В. Нефтисов, Н.М. Кабдуалиев, докторанты;
рук. М.Я. Клецель, д.т.н., проф. (ПГУ, г. Павлодар, Казахстан)

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЯРНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ГЕРКОНА, РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ПРОВОДНИКА С ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

Одной из актуальных задач электроэнергетики является разработка релейной защиты РЗ, не использующей трансформаторы тока ТА [1]. В дифференциально-фазных защитах на герконах (без ТА) необходимо обеспечивать полярность срабатывания геркона [2]. Известны два таких способа [2, 3]. Недостатками упомянутых способов являются: неприменимость при увеличении кратности тока в проводнике по отношению к току срабатывания более чем в 3 раза; малый срок службы устройств из-за быстрого старения геркона под действием постоянного МП и недостаточная чувствительность защит, использующих его.

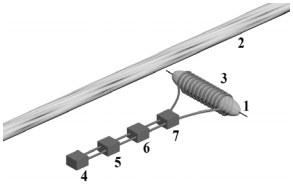


Рис. 1. Пример реализации

В данной работе предлагается способ обеспечения полярности срабатывания геркона, расположенного вблизи проводника с переменным током [4] и лишенного указанных недостатков. Способ (рис. 1) заключается в создании управляющего магнитного потока с помощью обмотки *3* управления на герконе *1* благодаря расположенному вблизи проводника *2* преобразователю *4*, с помощью которого измеряют электродвижущую силу (ЭДС), созданную магнитным потоком, вызванным током в проводнике, усиливают эту ЭДС в *5*, сдвигают по фазе в *6* и пропускают одну из ее полуволн с помощью *7* в обмотку управления геркона так, чтобы напряженность магнитного потока от тока в обмотке была направлена встречно напряженности магнитного потока, созданного током в проводнике.

Способ позволит создавать более чувствительные дифференциально-фазные защиты, чем при использовании других упомянутых способов, а также увеличить их срок службы.

Литература

1. **Кожович Л.А., Бишоп М.Т.**. Современные направления развития РЗиА энергосистем // Сборник докладов конференции. CIGRE, Москва, 2009.

2. **Клецель М.Я.** Принципы построения и модели дифференциальных защит электроустановок на герконах // Электротехника. 1991. № 10. С. 47—50.

3. **Диковский Я.М.** Магнитоуправляемые контакты. М.: Энергия, 1970.

4. **Способ** обеспечения полярности срабатывания геркона, расположенного вблизи проводника с переменным током / М.Я. Клецель, А.В. Нефтисов, Ю.С. Боровиков, Н.М. Кабдуалиев // Инновационный патент РК №27281.

А.И. Первеев, студ., А.Н. Митин, м.н.с.;
рук. М.В. Соколова, к.т.н., в.н.с. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ В ВОЗДУХЕ

В последние годы активизировались исследования поверхностного разряда (ПР), что связано с его широким использованием в различных электротехнологических устройствах. В качестве объекта исследования рассматривают поверхностный электрический разряд, развивающийся в трехэлектродой системе.

В процессе первых оценочных экспериментов [1, 2] было установлено, что интенсивность поверхностного разряда существенно зависит от наличия покрытий, наносимых на поверхность диэлектрического барьера, и их химического состава. На рис. 1 представлены осциллограммы импульсов тока микроразрядов за период воздействующего переменного напряжения с многополосного электрода. На этих осциллограммах видно, что при использовании покрытия SiO_2 более чем в 2 раза увеличивается амплитуда импульсов тока и число импульсов.

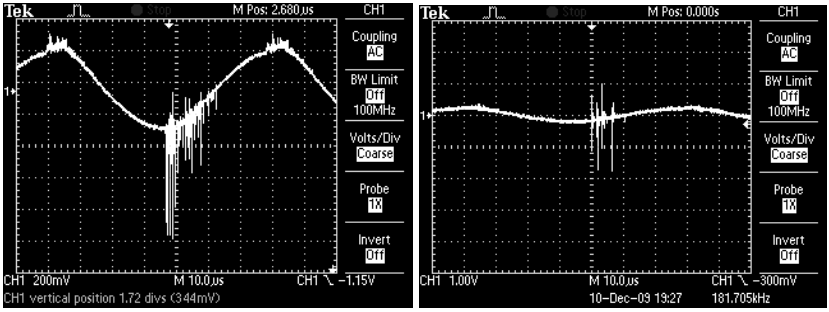


Рис. 1. Осциллограммы импульсов тока микроразрядов на пластине из керамики 22ХС с покрытием SiO_2 (справа) и без покрытия (слева)

Целью данной работы является дальнейшее исследование влияния покрытий на характеристики ПР и на интенсивность образования продуктов плазмохимических реакций в трехэлектродной системе с коронирующим многополосным электродом.

Литература

1. **Sokolova M., Hulka L., Pietsch G.J.** // Plasma Processes and Polymers. 2005. Vol. 2. P. 162—169.

2. **Sokolova M., Kozlov K., Mitin A., Tatarenko P.** // Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2013), 61: 24312.

А.А. Савенкова, студ.; рук. Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИЙ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В настоящее время защита от грозовых перенапряжений электрооборудования подстанций осуществляется в соответствии с требованиями ПУЭ, нормирующими расстояния между оборудованием и защитными разрядниками. Требования ПУЭ определены почти 40 лет назад для типовых подстанций (ПС) с применением упрощенных моделей и на основе идеализации форм волн грозового происхождения. В современной периодике часто встречается критика этого подхода [1]. На сегодняшний день методы численного моделирования позволяют скорректировать требования ПУЭ. В частности, на кафедре ТЭВН МЭИ разработаны программы ТТ и EMTLab, позволяющие выполнять расчет импульсных перенапряжений на ПС с детальным представлением трансформатора в схеме замещения [2].

С применением указанных программ разработаны расчетные модели ПС совместно с ВЛ, учитывающие тип опор ВЛ, длины гирлянд изоляторов, возможность установки ОПН на ВЛ, возникновение импульсной короны на проводах ВЛ и ошиновках ПС, статистический разброс параметров молнии. Электрическая прочность изоляции силового трансформатора определяется путем сопоставления перенапряжений на продольной (межвитковой и межкатушечной) изоляции обмоток с импульсной электрической прочностью соответствующих изоляционных промежутков по методу ВЭИ [3].

По результатам численного моделирования уточнены допустимые расстояния между ОПН и защищаемым электрооборудованием для ряда типовых схем ПС. Разработанные модели могут применяться проектными организациями для решения задач защиты электрооборудования ПС от набегающих волн грозового происхождения и позволят в дальнейшем выполнять расчеты для современных схем, в частности с кабельными вставками и КРУЭ с новым электрооборудованием.

Литература

1. **Актуальные** проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий / Б.В. Ефимов, Ф.Х. Халилов, А.Н. Новикова и др. // Труды Кольского НЦ РАН. 2012. № 1.

2. **Larin V.S., Zhuikov A.V., Matveev D.A.** Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network // CIGRE SC A2&C4 JC, Zurich, Switzerland, 2013.

3. **Ларин В.С., Лоханин А.К., Матвеев Д.А.** Методическое обеспечение ФГУП ВЭИ и реализующий его комплекс программ для проектирования изоляции силовых трансформаторов // Сб. науч. Тр. VII Междунар. науч.-тех. конф. «Силовые трансформаторы и системы диагностики», Москва, 2010.

Р.Ф. Салыев, студ.; рук-ли Л.Л. Черненский, к.т.н.,
А.Г. Темников, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

БАНК ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДОВ ИЗ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Одним из методов изучения физики молнии является применение искусственных заряженных аэрозольных образований (ЗАО). Использование искусственных грозовых облаков обеспечивает большой объем получаемых данных, позволяет одновременно регистрировать большое количество параметров разряда при малых затратах.

На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» накоплен большой объем экспериментальных данных и полученных на основе их обработки характеристик электрического разряда из ЗАО. Однако хранение результатов экспериментов в табличном виде (журнал экспериментов, файлы на диске компьютера) позволяет группировать (структурировать) информацию одновременно только по одному признаку (по дате, по типу исследования и т.п.) и не позволяет устанавливать какие-либо взаимосвязи с условиями эксперимента и характеристиками разряда.

Оптимальным вариантом решения этой проблемы является разработка банка данных, который позволил бы хранить экспериментальные данные и сведения о параметрах экспериментов. Разрабатываемый банк данных характеристик разрядов из ЗАО предоставит удобный доступ к информации, обеспечит ее быстрый поиск по заданным критериям, позволит получить выборку экспериментальных данных, необходимых для получения характеристик разрядов и их дальнейшего анализа.

На основании анализа полученных экспериментальных данных, их специфики, особенностей и взаимосвязей создана универсальная структура банка данных характеристик разрядов из ЗАО, которая в дальнейшем поможет создать рабочий банк данных и дружественный графический интерфейс для его заполнения. Структура разрабатываемого банка данных включает в себя следующие объекты:

- условия эксперимента;
- параметры измерительной аппаратуры;
- данные, регистрируемые в эксперименте;
- характеристики электрических разрядов, полученные в результате обработки этих данных.

Разрабатываемый банк данных может оказаться перспективным и в других областях науки и техники.

К.А. Смагин, студ.; рук. И.П. Верещагин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА НОВОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ В ПЛАСТИНЧАТОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ

В электрофильтре (ЭФ) протекают процессы, которые характеризуются сложным взаимодействием между турбулентным потоком газа, коронным разрядом, движением и зарядкой частиц. Точный учет всех процессов требует значительных вычислительных затрат, поэтому используются приближенные подходы. В частности, при расчете зарядки важным является учет предыстории движения частиц. Это легко сделать, решая уравнение движения каждой частицы. Однако при этом велики вычислительные затраты, которые не позволяют рассчитывать большие длины ЭФ и высокие входные концентрации пыли. Напротив, если частицы представляются еще одной средой, вычислительные затраты значительно уменьшаются, но возникают трудности при учете предыстории движения частиц.

Предлагаемая методика основывается на распределении концентрации частиц в турбулентной струе, выходящей из интервала заданной длины. Для такого распределения в двухмерном случае получено аналитическое выражение. Данная идея была реализована в программе расчета процесса осаждения в пластинчатом ЭФ, названной ПОТОК100. Расчет распространения частиц выполняется следующим образом. Канал ЭФ по длине разбивается на сечения, перпендикулярные направлению движения потока газа с заданным шагом. Каждое сечение разбивается на интервалы, в пределах которых концентрация частиц принимается постоянной. От каждого интервала в центрах интервалов следующего сечения рассчитывается концентрация частиц по аналитической формуле. Приращение заряда частиц определяется по формуле Потенье для «ударной» зарядки. Для каждого интервала в следующем сечении ведется история: какая часть потока частиц и с какими зарядами попадает на него. Получившееся распределение потоков и соответствующих им зарядов разбивается по заданному числу зарядов. Концентрация частиц с данным зарядом на каждом интервале в следующем сечении определяется по потоку частиц с этим значением заряда.

Таким образом, методика позволяет учесть влияние предыстории движения частиц на заряд, разброс зарядов, а также обеспечить условие сохранения потока частиц. Вычислительные затраты при этом малы, что позволяет рассчитывать большие длины ЭФ.

Были проведены расчеты и получены распределения концентраций, зарядов и потоков частиц в сечениях, а также распределение потока осаждения по длине ЭФ.

С.Ю. Токарев, асп.; рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Модальная система координат используется для расчета распространения волновых процессов по ЛЭП, которые не имеют оси симметрии относительно какой-либо фазы. Моды (волновые каналы) не имеют взаимного влияния друг на друга. Их характеристики при этом достаточно сильно различаются друг от друга. Эти особенности могут быть использованы для целей ОМП на волновом принципе.

Действительно, скорость распространения в земляном канале несколько меньше скорости распространения в воздушных каналах. Отмеченный факт позволяет по разности прихода сигнала в этих каналах сделать оценку положения места повреждения.

Однако постоянная распространения земляного канала имеет достаточно сложную частотную зависимость. Это в значительной степени осложняет задачу определения метки времени фронта и выбора адекватной величины скорости распространения в этот канале.

Кроме того, на практике фактически всегда отсутствует информация о текущих физических параметрах грунта. Это вносит дополнительную неопределенность при выявлении места повреждения.

В данной работе анализируется возможность использования земляного канала для целей одностороннего волнового ОМП и воздушных каналов для двухстороннего волнового ОМП. Последний случай сравнивается с решением непосредственно в фазной системе координат без введения модальной системы координат.

В качестве инструмента выявления волнового фронта и оценки его частотных составляющих используется математический аппарат вейвлетного преобразования. Анализ проводится в широком диапазоне масштабов как с привлечением действительных ядер вейвлетного преобразования, так и комплексных.

Форма сигналов в земляном и воздушном каналах сильно отличаются друг от друга. Поэтому для них используется разные ядра. Форма сигнала в воздушных каналах при изменении точки повреждения на линии изменяется мало. Это позволяет использовать для случая двухстороннего ОМП одно ядро для анализа сигнала с обеих сторон линии и, как следствие, возможность оценки положения повреждения с помощью функции корреляции вейвлетных коэффициентов.

Т.Е. Шадриков, асп.; рук. В.Ф. Воробьев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ СХЕМЫ УМНОЖЕНИЯ В УСТРОЙСТВЕ ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В городах наиболее актуальным способом передачи электроэнергии от распределительных подстанций до потребителя является кабельная сеть электроснабжения. Массово внедряемые в настоящее время кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция, XLPE) имеют высокие монтажные и эксплуатационные характеристики, что обуславливает их повсеместное применение.

Согласно нормативным документам РФ, все кабельные линии, вводимые и эксплуатируемые, должны быть испытаны повышенным напряжением. Испытание проводится двумя видами установок — установками с постоянным напряжением и установками с напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ). Вторые особенно актуальны для полимерной изоляции, так как не приводят к ее преждевременному старению и потере основных изоляционных свойств. Существуют также установки резонансного типа, однако их габариты и вес не позволяют получить требуемую мобильность при проведении выездных испытаний. Для создания испытательной установки нового поколения, сочетающей в себе высокие технические характеристики и массогабаритные параметры необходимо отказаться от традиционных элементов установок высокого напряжения — повышающего высоковольтного трансформатора с магнитопроводом. Для повышения напряжения на объекте испытаний необходимо прибегнуть к использованию схемы умножения напряжения. Схема умножения напряжения использует ступенчатый принцип зарядки от источника питания. При этом энергия запасается не в магнитопроводе трансформатора, а в конденсаторах схемы. Выходное напряжение схемы умножения получается постоянным и может быть использовано для испытаний кабелей с не полимерной изоляцией. Для реализации переменного напряжения на выходе схемы умножения необходим блок управления схемой, который осуществляет разрядку конденсаторов во второй четверти периода колебания напряжения и осуществляет переключение полярности выходного напряжения до начала второго полупериода формирования напряжения. Блок разрядки-управления может быть реализован на современных элементах силовой электроники.

Создание универсального диагностического устройства очень актуально в эпоху повсеместного перехода на кабели с полимерной изоляцией.

А.Ф. Шарифуллин, А.Х. Абдрахманов, студенты;
рук-ли Э.Ф. Хакимзянов, ст. преп.: Р.Г. Исаков, к.т.н., преп.
(КГЭУ, г. Казань)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Опыт многолетней эксплуатации различных по принципу действия устройств релейной защиты (УРЗ) от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), а также анализ многочисленных публикаций по данной тематике [1–2] позволяют с уверенностью утверждать, что общепризнанного по селективности и надежности действия УРЗ от ОЗЗ для сетей с различными режимами заземления нейтрали в настоящее время не существует.

Как известно, в качестве защит от ОЗЗ применяются в основном защиты, основанные на измерении тока и напряжения нулевой последовательности. Последствия ОЗЗ — различные виды перенапряжений, повышение напряжений в неповрежденных фазах, что может привести к пробою изоляции неповрежденных фаз и переходу ОЗЗ в двойное замыкание на землю (ДЗЗ), по характеристикам близкое к двухфазным КЗ. Организация селективной защиты от ДЗЗ — трудная задача.

В работе приводится общепринятая методика расчета токов нулевой последовательности с учетом схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательности [3]. Полученные результаты расчета токов и напряжений впоследствии предлагается использовать при разработке алгоритмов определения замыканий на землю в распределительных сетях 6—35 кВ на основе замеров сопротивлений междуфазных и фазных контуров.

В общем случае ток замыкания на землю определяется как

$$I_{\text{кА}} = 3\,I_{\text{кА1}} = \frac{3U_{\text{ф}}}{Z_{\text{и1}} + Z_{\text{и2}} + Z_{\text{л1}} + Z_{\text{л2}} + Z_{\text{л0}} - jX_{\text{с}} + R_{\text{з}}}, \qquad (1)$$

где $Z_{\text{и1}}$, $Z_{\text{и2}}$ — сопротивления прямой и обратной последовательностей источника; $Z_{\text{л1}}$, $Z_{\text{л2}}$, $Z_{\text{л0}}$ — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей линии; $jX_{\text{с}}$ — суммарное емкостное сопротивление смежных линий; $R_{\text{з}}$ — сопротивление земли.

Проведенные расчеты совпали с токами замыкания на землю в программной среде MatLabSimulink.

Литература

1. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. (Библиотечка электротехника). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. Вып. 11(35). — 104 с.

2. **Шабад М.А.** Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6—35 кВ. СПб.: ПЭИПК, 2001.

3. **Готман В.И.** Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах. Томск: ТПУ, 2011.

И.Р. Юсупов, асп.; рук. А.И. Федотов, д.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6—35 кВ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Функционирование единого сетевого электротехнического комплекса России невозможно без надежной работы распределительных электрических сетей. В современных условиях непрерывно возрастают требования к надежности и бесперебойности электроснабжения. В связи с этим предотвращение или быстрая ликвидация повреждений электрических сетей является важнейшей задачей.

Воздушные линии являются наименее надежными элементами энергосистемы. В сетях 6–10 кВ в среднем происходит 26 отключений в год в расчете на 100 км воздушных и кабельных линий. При этом задача определения места повреждения является наиболее сложной и часто требующей длительной операции по восстановлению поврежденного участка. Особую сложность составляет поиск следов перекрытия изоляторов в воздушных линиях.

Работы отечественных ученых посвящены исследованиям сетей с изолированной или компенсированной нейтралью и разработке методов для поиска места повреждения на воздушных линиях. При этом для воздушных линий напряжением 6—35 кВ, составляющих основу распределительных сетей, до сих пор не существует реально используемых эффективных методов дистанционного определения места повреждения. Имеются лишь устройства для определения участка, где произошло повреждение линии. Но в силу того, что на каждую линию требуется установка по несколько таких устройств, мероприятие является дорогостоящим и не имеет широкого применения.

На сегодняшний день в районных электрических сетях распространяется внедрение новых систем коммерческого учета электроэнергии, некоторые модели которого имеют функции оценки показателей качества электроэнергии. В результате появляется возможность использования параметров аварийных режимов на подстанциях в алгоритмах определения мест повреждения воздушных линий районных электрических сетей, измеряемых на стороне 0,4 кВ и не требующих дополнительной установки высоковольтных измерительных трансформаторов. Так, например, в данной работе проводиться анализ гармонического распределения напряжения на поврежденной фазе.

Полученные результаты позволят разработать алгоритм для устройств определения места замыкания в сетях 6—10 кВ, используя установленные узлы коммерческого учета с функцией оценки качества электроэнергии.

А.А. Яблоков, асп.; рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗОМКНУТЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

В нормативных документах наряду с метрологическими требованиями к измерительным трансформаторам напряжения (ТН) предъявляются требования по устойчивости к феррорезонансным явлениям. В качестве решения вопросов устойчивости предлагается применять трансформатор напряжения с разомкнутым магнитопроводом. Однако использование для расчета трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом существующих инженерных методик, основанных на предположении того, что весь магнитный поток проходит и замыкается по ферромагнитному сердечнику, приводит к существенным погрешностям. В работах [1, 2] приведены методы расчета трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом и на их основе проведено сравнение нескольких вариантов конструкций по метрологическим характеристикам (амплитудным и фазовым погрешностям основной частоты).

Для исследования антирезонансных свойств ТН был разработан алгоритм, позволяющий проводить совместные полевые и цепные расчеты. Традиционно для исследования трансформаторов напряжения используется кривая намагничивания в форме зависимости потокосцепления от тока, протекающего по первичной обмотке. Для сравнительного анализа антирезонансных свойств данная зависимость была определена для ТН с замкнутым и разомкнутым магнитопроводами. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что диапазон емкостей, с которыми ТН с разомкнутым магнитопроводом может входить в резонанс, значительно меньше по сравнению с ТН с замкнутым магнитопроводом. Индуктивность катушек ТН с разомкнутым магнитопроводом изменяется значительно меньше с ростом первичного тока и при насыщении примерно в пять раз меньше, чем индуктивность катушек ТН с замкнутым магнитопроводом.

Литература

1. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А.** Определение параметров элементов антирезонансного трансформатора напряжения на основе компьютерного полевого моделирования (методы моделирования и исследование вычислительных погрешностей) // Вестник научно-промышленного общества. М.: «Алев-В», 2010. Вып. 14. С. 51—59.

2. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А.** Исследование антирезонансного трансформатора напряжения 220 кВ на основе математического моделирования. Сравнительный анализ конструкций // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 5. С. 25—28.

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ — ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА 3
Секция 39. Атомные электрические станции и установки 5
Секция 40. Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии 24
Секция 41. Теплофизика 42
Секция 42. Техника и физика низких температур 61
Секция 43. Нанотехнологии 69
НАПРАВЛЕНИЕ — ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА 79
Секция 44. Котельные установки и охрана окружающей среды 81
Секция 45. Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС 95
Секция 46. Схемы и режимы работы тепловых электрических станций 112
Секция 47. Контроль, автоматизация и управление в энергетике 141
НАПРАВЛЕНИЕ — ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ 177
Секция 48. Энергетические установки и двигатели 179
Секция 49. Проблемы технологии, надежности и конструирования 211
Секция 50. Робототехнические и мехатронные системы 228
НАПРАВЛЕНИЕ — ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 245
Секция 51. Электроэнергетические системы 247
Секция 52. Электроснабжение 280
Секция 53. Электрические станции 300
Секция 54. Возобновляемые источники энергии 315
Секция 55. Электрофизика и системы управления электроэнергетических объектов 344

Научное издание

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

Двадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов

Тезисы докладов

В 4 томах

Том 4

Редактор *Г.Ф. Раджабова*. Корректор *Н.А. Хрущева*
Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета *М.Н. Маркиной*

Подписано в печать 16.01.2014 Формат 60×84/16
Печать офсетная Усл. п.л. 21,6 Уч.-изд. л. 21,0
Тираж 370 экз. Заказ

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14
Отпечатано в Академиздатцентре «Наука» РАН, 117864, Москва, ул. Профсоюзная, д. 90