

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

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

25—26 февраля 2016 г., Москва

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ТОМ 3



УДК 621.3+621.37[(043.2)]

Р 154

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕ-
Р 154 **ТИКА:** Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — 356 с.

ISBN 978-5-383-01018-1

ISBN 978-5-383-01021-1 (Том 3)

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

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

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

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Роголёв Н.Д. — ректор, председатель Оргкомитета

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

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

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

С.А. Цырук — помощник проректора по научной работе

А.Е. Тарасов — начальник отдела международных связей

С.А. Грузков — директор ИЭТ

И.Н. Мирошникова — директор ИРЭ

А.В. Дедов — директор ИТАЭ

П.А. Бутырин — директор ИЭЭ

В.П. Лунин — директор АВТИ

С.А. Серков — директор ЭнМИ

С.В. Захаров — директор ИПЭЭф

А.Ю. Невский — директор ИнЭИ

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

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

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

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

ISBN 978-5-383-01018-1

ISBN 978-5-383-01021-1 (Том 3)

© Авторы, 2016

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2016

Направление
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
И ТЕПЛОФИЗИКА

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

Секция 38

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И УСТАНОВКИ

*Председатель секции — зав. каф. АЭС, д.т.н., Ю.В. Парфёнов
Секретарь секции — вед. инженер Р.Х. Хасанов*

*М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, аспиранты;
рук-ли Ю.Б. Чертков, к.ф.-м.н., доц.; А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доц.
(НИ ТПУ, г. Томск)*

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАССЕЙНОВОГО РЕАКТОРА ИРТ-Т

Реактор ИРТ-Т успешно эксплуатируется уже почти 50 лет (с 1967 г.). С 1977 по 1984 г. проведена полная модернизация реактора [1]. Его мощность увеличена с 2 до 6 МВт, а в 2005 г. была модернизирована его система управления и защиты.

Основным параметром, определяющим экспериментальные и эксплуатационные особенности исследовательского ядерного реактора, является плотность потока нейтронов в его экспериментальных объемах.

Существующая компоновка активной зоны в поперечном сечении представляет прямоугольник, что далеко от идеальной квадратной компоновки. Это приводит к существенному увеличению неоднородности распределения плотности потока нейтронов и энерговыделения, что сказывается на возможности проведения различных экспериментов [2]. В настоящей работе рассматривался вариант повышения плотности потоков нейтронов путем изменения конфигурации активной зоны.

Были рассмотрены девять альтернативных компоновок активной зоны реактора с меньшим количеством тепловыделяющих сборок, а также с изменением конфигурации центральной бериллиевой ловушки. Обоснована возможность повышения плотности потока нейтронов в экспериментальных объемах реактора при использовании более плотных компоновок ТВС. При этом существенно увеличивается однородность распределения энерговыделения по объему активной зоны, а также появляются дополни-

тельные возможности для увеличения объемов проводимых экспериментов. Кроме того, значительно повышается глубина выгорания топлива в отработавших ТВС и уменьшается ежегодная потребность в свежих ТВС для этого реактора.

Литература

1. **Исследовательский** ядерный реактор ИРТ-Т / В.А. Варлачев и др. Томск: Изд-во ТПУ, 2002.
2. **Исследование** распределения поля энерговыделения в реакторе ИРТ-Т при различном положении стержней регулирования / А.Г. Наймушин и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11—2. С. 353—359.

ОЦЕНКА ПИКОВОЙ МОЩНОСТИ ПТУ ЭНЕРГБЛОКА ВВЭР-1200 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ САТЭ

Износ мощностей традиционной энергетики и прогнозируемый рост мощностей АЭС делают практически неизбежным участие АЭС в суточном регулировании [1]. Маневрирование мощностью реакторной установки (РУ) порождает ряд существенных проблем (в частности, термоциклирование топлива) и оказывается крайне нежелательным как по экономическим соображениям, так и в силу влияния на безопасность.

Альтернативой, позволяющей решать задачи маневрирования при сохранении базового режима РУ, является использование систем аккумулирования тепловой энергии (САТЭ) на основе высокотемпературного теплоносителя (ВТТ) [2].

В работе выполнен расчет пиковой мощности паротурбинной установки (ПТУ) энергоблока ВВЭР-1200 и параметров аккумулирования при различных схемах замещения регенеративных подогревателей (РП) в пиковом режиме при ночной разгрузке энергоблока на 10 % в течение 7 ч. Использовался классический алгоритм расчета тепловых схем [3].

Были получены следующие результаты:

1) Прирост мощности, в зависимости от схемы включения САТЭ, составил от 2,3 до 11 % сверх номинальной в течение от 13 до 5 ч при КПД аккумулирования от 85 до 83 % соответственно.

2) Необходимая масса ВТТ существенно зависит от варианта включения САТЭ и диктуемого схемой диапазона рабочих температур ВТТ и меняется от 61 до 24 тыс. т.

3) Наилучшие технические показатели демонстрирует вариант с заменой максимального числа РП (максимальный прирост мощности, минимальная масса ВТТ при высоком КПД).

Литература

1. **Смирнова Л.С., Родионова Е.В.** АЭС в российской модели рынка электроэнергии и мощности // 9-я Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., 2014.

2. **Сопленков К.И., Чаховский В.М., Воронин А.Л.** Система аккумулирования тепловой энергии (САТЭ) повысит конкурентоспособность АЭС в условиях суточного регулирования электрических нагрузок. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИН-ФОРМ», Центр «Атоминновация», 2007.

3. **Зорин В.М.** Атомные электростанции: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 672 с.

Н.С. Вододохов, студ.; рук. С.В. Иванов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (УИСО)

Решение проблемы экологически безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО) атомных станций наряду с проблемой обеспечения безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС является важнейшей и первоочередной задачей, решение которой может в значительной мере обеспечить возврат доверия к атомной энергетике и ее дальнейшее развитие.

Техническая политика в области обращения с РАО как в мире, так и в России предусматривает разработку и реализацию безопасных методов, технологий и технических средств по переработке, хранению, транспортировке и окончательной изоляции твердых и отвержденных РАО от окружающей человека природной среды на весь срок сохранения РАО потенциальной опасности или на необходимый срок [1].

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) АЭС в виде кубовых остатков представляют собой солевые растворы высокой концентрации, загрязненные продуктами деления, радионуклидами коррозионного происхождения, различными веществами, используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования. Традиционными методами переработки кубовых остатков являются глубокое упаривание, цементирование и битумирование. Эти методы позволяют перевести ЖРО в инертную форму, пригодную для захоронения, но не дают значительного сокращения объема конечного радиоактивного продукта [2].

Для переработки кубовых остатков предлагается использовать отечественную референтную технологию ионселективной очистки. Промышленная установка УИСО работает на Кольской АЭС с 2005 г.

Литература

1. **Корчагин Ю.П., Хамьянов Л.П., Хубцов С.Б.** Новые технологические схемы переработки ЖРО атомных станций // Международная конференция «Радиоактивные отходы. Хранение, транспортировка, переработка. Влияние на человека и окружающую среду». г. С.-Петербург, 14—18 октября.

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

*Г.Ю. Волков, Р.С. Шуклин, студенты; рук. К.Н. Проскуряков, д.т.н.,
проф. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ АЭС-2006

Согласно регламенту эксплуатации атомных электрических станций (АЭС), пуском энергоблока является перевод его в состояние «работа блока на энергетическом уровне мощности». Процесс пуска включает следующие этапы: перевод блока из «холодного» состояния в «горячее», разогрев 1-го контура до рабочих параметров, вывод реактора в критическое состояние («РК»), перевод блока из состояния «РК» в состояние «энергетический уровень мощности». Известно, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов. Для прогнозирования виброакустических резонансов в процессе пуска энергоблока необходимо знать частоты собственных колебаний оборудования и его элементов, а также частоты собственных колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) на различных этапах пусковых режимов. Использование современных информационных технологий для виброакустической диагностики АЭС базируется на результатах измерений и анализе спектров колебаний оборудования и пульсаций давления теплоносителя в оборудовании и трубопроводах. Эти результаты будут получены в процессе предстоящего пуска головного энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС. В данной работе представлены результаты расчета СЧКДТ на различных этапах пусковых режимов. Анализ результатов указывает на то, что при определенных значениях акустических параметров теплоносителя создаются условия для возникновения непроеKTного уровня вибраций в оборудовании первого контура. Сопоставление данных расчета с результатами измерений предполагается использовать для верификации и совершенствования разработанных моделей расчета СЧКДТ. Полученные результаты могут найти применение для совершенствования эксплуатации энергоблоков АЭС-2006, а также на стадии проектирования и конструирования АЭС нового поколения для обоснования целостности их конструкций и основного оборудования на срок службы до 60—80 лет. После аварии на японской АЭС «Фукусима Дайичи 1» особую актуальность приобрела задача прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в маневренных и аварийных режимах, а также при ударных и сейсмических воздействиях.

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

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИК СИМУЛЯЦИИ РЕАКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ НА ТРЕНАЖЕРЕ-ИМИТАТОРЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000

Безопасный пуск и последующая эксплуатация ядерного реактора возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик с точностью, удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности и теплотехнической надежности активной зоны.

В соответствии с существующими руководящими документами для энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 (РД ЭО 0150-2004, РД ЭО 0151-2004) обработка результатов экспериментов по определению нейтронно-физических характеристик горячего реактора основывается на решении уравнений кинетики «точечного» реактора. Реактивность реактора в быстрых переходных процессах зависит от температур топлива и теплоносителя, которые, в свою очередь, определяются на основе решения уравнений тепломассопереноса, также записанных для «точечного» реактора. В этих уравнениях фигурируют температуры теплоносителя, усредненные как поперек каналов теплоносителя на входе в активную зону и выходе из нее, так и усредненные по ширине и высоте каналов теплоносителя. При этом связь между этими температурами определяется декларативно, исходя из предположения о том, что распределение средней поперек канала температуры по высоте активной зоны определяется линейным законом.

Предложена математическая модель, позволяющая установить эту связь и обосновать ее. Показано, что зависимость распределения средней по сечению канала температуры теплоносителя по высоте определяется законом объемного тепловыделения по высоте, а в случае несимметричности последнего усредненная по всей активной зоне температура определяется соответствующей нелинейной зависимостью. Кроме того, проведены численные эксперименты, позволяющие оценить вносимую установленным фактом погрешность.

Результаты исследований использованы при разработке комплекса обучающих программ, касающегося симуляции нейтронно-физических экспериментов на тренажере-имитаторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Проведена необходимая адаптация методик нейтронно-физических измерений к компьютерному имитатору, разработаны программы и методическое обеспечение для их симуляции на тренажере и обработки результатов симулируемых экспериментов.

*С.К. Дмитриев, студ.; И.И. Лебедев, асп.;
рук. А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доц. (НИ ТПУ, г. Томск)*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ТВС РЕАКТОРА ИРТ-Т ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ

В связи с высокой активностью облученных тепловыделяющих сборок предъявляются высокие требования к обеспечению безопасности проведения работ, связанных с ОТВС. Именно поэтому целесообразно проводить расчетные исследования активности ТВС еще на стадии подготовки к перегрузочным и другим работам, вследствие которых возможно облучение персонала.

Во время эксплуатации ядерного реактора в топливе образуется огромное количество нуклидов, которые оказывают влияние не только на нейтронно-физические характеристики ядерного реактора, но и являются источниками ионизирующего излучения.

Для проведения оценки активности ТВС типа ИРТ-3М необходимо провести моделирование множества цепочек распада тяжелых ядер с учетом влияния всех дочерних нуклидов, а также особенностей эксплуатации исследовательского реактора.

Входными данными [1] для создания аналитических зависимостей динамики нуклидного состава во время эксплуатации и хранения топлива являются значения концентраций нуклидов, образующихся в ядерном топливе при его выгорании, полученные с помощью прецизионной программы MCU, использующей библиотеку ядерных данных MCUIB50 [2].

В ходе выполнения работы разработана методика оценки активности облученного ядерного топлива в зависимости от специфики эксплуатации сборок исследовательского ядерного реактора, а также в зависимости от времени хранения ОТВС.

На основе полученных данных было разработано программное обеспечение, позволяющее определять активность ТВС в любой момент времени с учетом времени облучения тепловыделяющей сборки, что позволяет проводить дальнейшие исследования активности отработавшей тепловыделяющей сборки на этапе хранения и утилизации.

Литература

1. **Дмитриев С.К., Бусыгин А.С., Лебедев И.И., Аникин М.Н.** Кинетика изменения нуклидного состава топлива в тепловыделяющих сборках реактора ИРТ-Т // Сборник научных трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. 2015. С. 615—617.
2. **Feasibility Study of Using New Fuel Composition in IRT-T Research Reactor / A.G. Naymushin et al.** // *Advanced Materials Research*. 2015. Т. 1084. С. 306—308.

И.И. Зайкин, асп.; рук. С.И. Рясный, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЭС

Рассмотрены условия использования методологии SMA, основанной на использовании зарубежных баз данных сейсмической аттестации оборудования, связанные с недостаточной методической обоснованностью применения этих баз данных, а также недоступностью этих баз для российских организаций.

Представлена модифицированная методология оценки запаса сейсмостойкости [1], включающая основные условия и процедуры оценки запаса сейсмостойкости, которая, в отличие от методологии SMA [2], не предусматривает полного отказа от расчетно-экспериментальной оценки сейсмической безопасности конструкций, систем и элементов в натуральных условиях [3]. Однако в представленной методологии предусмотрены возможности обоснованного сокращения объемов работ, в том числе исключения расчетно-экспериментальной оценки [4], основанные на использовании собственной отечественной базы сейсмической аттестации оборудования, работа над созданием которой ведется в настоящее время.

Результаты оценки запаса сейсмостойкости используются при продлении срока эксплуатации, переоценке безопасности, вероятностном анализе безопасности, разработке и пересмотре пределов и условий эксплуатации, аварийных инструкций, при установлении технических требований к оборудованию, при разработке мероприятий по модернизации и реконструкции, повышению безопасности АЭС.

Литература

1. **Оценка** сейсмической безопасности существующих ядерных установок. Руководство № NS-G-2.13. // Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Вена: МАГАТЭ, 2014 г.
2. **A Methodology** for assessment of nuclear power plant seismic margin (Revision 1) // Palo Alto, California: EPRI NP-6041-SL Revision 1 Project 2722-23 Final Report. August, 1991.
3. **Сравнительный** анализ зарубежных и российских методологий оценки сейсмостойкости оборудования АЭС / Э.С. Сааков, С.И. Рясный, П.С. Казновский и др. // Атомная энергия. Т. 115. Вып. 6. М., 2013. С. 309—317.
4. **Повышение** эффективности расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС с применением базы данных / Э.С. Сааков, С.И. Рясный, И.И. Зайкин и др. // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 3 (март). С. 137—141.

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

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ПОЛНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНИЙ

Импульсные линии (ИЛ), ведущие к дифференциальным манометрам, воспринимают вибрации напорных трубопроводов, вызванные работой центробежных насосов, внешними вибрационными воздействиями, передающимися через опорные конструкции, и гидродинамическими колебаниями в потоке текучей среды. При совпадении частот пульсаций давления воды, в трубопроводах с собственными частотами ИЛ возникает резонанс, наибольшие перемещения конструкции с возникновением напряженно-деформационного состояния и, как следствие, усталости материала в местах приварки штуцеров расходомерных шайб и ИЛ. Целью расчета является определение собственных частот трубопроводов, ИЛ и их перемещений на вычисленных собственных частотах. Для решения задачи использован метод конечных элементов. Метод конечных элементов является мощным средством для решения дифференциальных уравнений с частными производными. Суть метода состоит в том, что область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное число подобластей (элементов). В каждом из элементов выбирается вид аппроксимирующей функции. Коэффициенты аппроксимирующих функций определяются из условия равенства значений соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, систему линейных алгебраических уравнений можно представить в виде разреженной матрицы, что существенно упрощает ее решение. Рассчитаны первые моды собственных частот исследуемой системы, их значения находятся в диапазоне от 0 до 100 Гц, при резонансе, возникающем на этих частотах, имеет место наибольшая повреждаемость ИЛ в местах приварки. Результаты измерения виброскоростей, полученные в виде спектральных плотностей мощности, показывают, что подавляющее число частот, соответствующих характерным пикам виброскоростей, совпадает со значениями собственных частот импульсных линий, полученных расчетным путем. Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости установки дополнительных опор в трубопроводной системе.

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСОВ КОЛЕБАНИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ВИБРАЦИЯМИ ОБОРУДОВАНИЯ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ АЭС С ВВЭР-440

Во многих случаях внезапные отказы оборудования и аварии происходят из-за существования непроектных динамических нагрузок. Одной из причин внезапности является неконтролируемое накопление усталости металла в результате возникновения непредусмотренных в проекте высокочастотных нагрузок. В работе [1] впервые теоретически обоснована генерация акустических стоячих волн (АСВ) в компенсаторе давления (КД). В настоящей работе показано, что в первом контуре АЭС распространяются АСВ, генерируемые самостоятельными и совместными колебаниями парового и водяного объемов, содержащихся в КД. Приведены результаты расчетов частот АСВ, генерируемых в КД АЭС с ВВЭР-440, в зависимости от уровня воды в КД и параметров теплоносителя. Уровни воды в КД варьировались согласно условиям безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР-440, определенным в технологическом регламенте, где сказано, что объем азотной подушки не должен быть менее 2 м^3 . Ввиду этого допустимая высота азотной подушки в КД находится в диапазоне от 0,46 до 3,475 м. В качестве верхней границы объема азотной подушки было выбрано значение 15 м^3 . В пределах этого диапазона выявлены значения уровней воды, при которых частоты АСВ, возникающие в КД ВВЭР-440 в режимах «холодного пуска», вызывают резонансы с вибрациями внутрикорпусных устройств (ВКУ) реактора и резонансы с оборотной частотой главного циркуляционного насоса. Аналогичные расчеты, проведенные для «горячих состояний» реактора, показывают, что опасным, ввиду возникновения условий для виброакустического резонанса, является режим, при котором частота АСВ парового объема КД совпадает с частотой колебаний шахты реактора, равной 14,2 Гц. Результат прогноза указывает на необходимость корректировки регламента пусковых режимов в целях недопущения в данном «горячем состоянии» реактора выявленного уровня воды в КД.

Литература

1. **Проскуряков К.Н., Стоянов С.П., Нидцбалла Г.** Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС // *Тр. МЭИ*. 1979. Вып. 407.

*Д.Е. Золотых, студ.; М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, аспиранты;
рук. А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доц. (НИ ТПУ, г. Томск)*

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРИЯ В ЗОНЕ ВОСПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТА РЕАКТОРА БН-1200

Использование ядерных реакторов на быстрых нейтронах считается перспективным шагом к замыканию ядерно-топливного цикла.

Разведанные запасы тория в земной коре в несколько раз превышают запасы урана, что потенциально существенно увеличивает сырьевую базу ядерной энергетики в случае использования замкнутого ядерного топливного цикла [1].

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности использования тория в зоне воспроизводства проекта реактора БН-1200. Для этих целей была разработана расчетная модель активной зоны реактора с помощью прецизионной программы MSU.

В ходе выполнения работы были определены основные особенности применимости торийсодержащих материалов в работе ядерного реактора на быстрых нейтронах. Показано, что торий-232 является наиболее эффективным изотопом по сравнению с ураном-238 для реакторов с быстрым спектром нейтронов, поскольку образующийся уран-233 не претерпевает последующих ядерных превращений и испускает более двух нейтронов в расчете на один захват первичного нейтрона для широкого набора реакторов, что является лучшим показателем для делящихся изотопов.

Рассмотрены перспективные варианты топливных композиций как для боковой зоны воспроизводства, так и для нижней торцевой зоны воспроизводства [2]. Приведены достигаемые значения глубины выгорания при использовании различных видов топливных композиций зон воспроизводства. Оценена степень вовлечения воспроизводящих нуклидов в топливный цикл в течение кампании топливной сборки.

Литература

1. **Лебедев И.И., Чуйкина А.В.** Влияние компоновки активной зоны на длительность микрокампании в проекте реактора БН-1200 // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: Сб. тез. VI Межд. научно-практ. конф. Томск, 2014. С. 70.

2. **Аникин М.Н., Чуйкина А.В., Нуркин А.С.** Перспективные виды топливных композиций для проекта реакторной установки БН-1200 // Современные техника и технологии: Тр. XX Межд. научно-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых. Томск, 2014. Т. 3. С. 60—61.

ВЕРИФИКАЦИЯ И ИНТЕГРИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ЕВКЛИД» МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ ГОМОГЕНИЗИРОВАННЫХ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ С УЧЕТОМ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА И ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ

В нейтронно-физическом коде DN3D, интегрированном в интегральный комплекс ЕВКЛИД, используется расчетная модель РУ на быстрых нейтронах, в соответствии с которой активная зона представляется в виде совокупности расчетных объемов, образующих регулярную гексагональную решетку в плоскости (X,Y) с равномерным шагом по высоте активной зоны [1].

Для подготовки библиотеки групповых нейтронно-физических констант на сетке теплогидравлических параметров при нулевом выгорании топлива в интегральном комплексе ЕВКЛИД используется гомогенная опция программы CONSYST, которая не позволяет учесть гетерогенные эффекты, связанные с внутренней структурой расчетных объемов, и подготовить библиотеку групповых гомогенизированных нейтронно-физических констант в зависимости от выгорания топлива.

В рамках данной работы разрабатывается методика подготовки библиотеки групповых гомогенизированных по расчетным объемам нейтронно-физических констант на сетке теплогидравлических параметров в зависимости от выгорания топлива с учетом гетерогенных эффектов и реального окружения, которая будет использоваться для проведения расчетов по интегральному комплексу ЕВКЛИД. Данная методика основана на решении интегрального уравнения переноса нейтронов методом вероятностей столкновений.

Интегрирование вышеуказанной методики подготовки гомогенизированных нейтронно-физических констант в интегральный комплекс ЕВКЛИД позволит проводить более точные расчеты кампаний реакторов на быстрых нейтронах за счет введения в расчет нейтронно-физических констант поправки на гетерогенные эффекты.

Литература

1. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБКИ ПАРОГЕНЕРАТОРА С ТЖМТ

Проектируемые ядерные энергетические установки (ЯЭУ) с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) характеризуются большой разницей давлений в первом и втором контурах [1]. Межконтурная неплотность в таких ЯЭУ может привести к генерации мощной ударной волны, способной не только увеличить площадь имеющегося дефекта, но и вызвать новые разрушения теплообменной поверхности (лавинообразный разрыв трубок) [2]. Быстрое вскипание и расширение двухфазной смеси в свинце способствует дополнительному гидродинамическому воздействию на внутриреакторные конструкции. В этой связи необходимо тщательное исследование начальной стадии протекания рассматриваемой проектной аварии.

Один из наиболее подходящих методов исследования — численное моделирование, предполагающее разработку численной модели, ее программную реализацию с последующей валидацией и верификацией на опытных данных.

В работе представлены результаты численного эксперимента по вскипанию капли воды в жидком свинце на основе различных математических моделей. Проведен анализ и сравнение полученных решений, а также разработаны рекомендации по дальнейшему усовершенствованию программных средств.

В расчетах удалось получить характеристики скачков давления на различных расстояниях от места разрыва, а также провести обработку в специальных безразмерных переменных [3]. Полученные аппроксимационные функции позволяют оценивать ударно-волновое воздействие на внутриреакторное оборудование при разрыве трубки парогенератора реакторной установки БРЕСТ. В частности, в работе показано, что локальные скачки давления не способны вызвать лавинообразный разрыв труб, поскольку максимальное значение силы на два порядка меньше максимально допустимого проектного предела.

Литература

1. **Безносков А.В., Бокова Т.А.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике: учебное пособие / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 536 с.

2. **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.

3. **Makhviladze G.M., Yakush S.E.** Modelling of Formation and Combustion of Accidentally Released Fuel Clouds // Process Safety and Envir. Protect. 2005. V. 83, pt. B2. P. 171—177.

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

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЖЕКТОРЕ С ПОМОЩЬЮ CFD-КОДА

В проекте «АЭС-2006» в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура реакторной установки планируется использовать агрегат «насос—эжектор», который представляет собой соединение насоса высокого давления и водо-водяного эжектора, устанавливаемого на напорной стороне насоса. Предполагается, что в аварийных условиях в случае высокого давления в первом контуре (от 8 до 2 МПа) будет работать только насос высокого давления, а при снижении давления ниже 2 МПа в работу также включится эжектор, увеличивая расход подаваемой воды, что соответствует режиму работы насоса САОЗ низкого давления [1].

В 2006 г. на стенде КЦ (ЭНИЦ) [2] были проведены испытания эжектора. В результате проведения стендовых испытаний была определена напорно-расходная характеристика эжектора. Снижение давления на выходе из диффузора сначала вызывает увеличение расхода инжектируемой воды, но затем достигается предельное значение ее расхода, и дальнейшее уменьшение давления на выходе из диффузора больше не приводит к возрастанию расхода инжектируемой воды.

Был выполнен анализ гидродинамических процессов, протекающих в проточной части эжектора с помощью CFD-кода. Была разработана расчетная сетка в соответствии с геометрическими параметрами эжектора, которая включала в себя около 300 000 ячеек. На рис. 1 показаны распределение давления и линии тока вблизи рабочего сопла для одного из экспериментальных режимов. Видно, что вблизи входа в камеру смешения образуются вихревые течения с пониженным давлением.

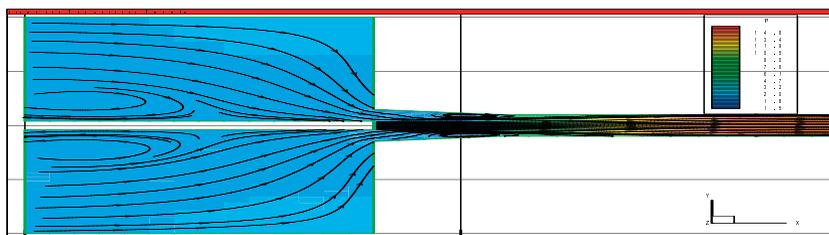


Рис. 1. Распределение давления и линии тока вблизи рабочего сопла

Литература

1. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Результаты эксперимента на установке КЦ по определению расходно-напорной характеристики агрегата «насос-эжектор»: Экспресс-отчет ФГУП «ЭНИЦ». Электрогорск, 2006. 33 с.

И.П. Крылов, студ.; рук. А.Г. Ильченко, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АЭС С ВТГР И ГТУ

В данной работе производится анализ тепловой экономичности варианта АЭС с ВТГР и газотурбинной установкой. Преимуществом ГТУ является использование высоких температур при относительно низких давлениях, а также большой КПД в широком диапазоне мощностей. В качестве рабочего тела принят гелий, который является наиболее приемлемым газом для высокотемпературных ядерных установок [1].

В ходе анализа тепловой экономичности регенеративного цикла ГТУ варьировались степень регенерации σ и степень повышения давления в компрессоре ν при постоянной начальной температуре гелия перед турбиной 1000 °С (ограничивается жаропрочностью и жаростойкостью элементов реактора). Давление гелия на выходе из реактора 5 МПа. Температура гелия перед компрессором принята равной 30 °С. При проведении расчетов учитывались потери давления в реакторе, регенераторе и охладителях.

Как показали расчеты, для простого закрытого газотурбинного цикла (без регенерации) оптимальная степень повышения давления в компрессоре ν находится в интервале 3,5—5,5 при значении внутреннего КПД цикла η_i около 28 %.

Применение регенерации позволяет существенно повысить тепловую экономичность ГТУ. С повышением степени регенерации оптимальное значение ν снижается, и при предельной регенерации ($\sigma = 1$) оно составляет примерно 2,5 (с учетом уменьшения полезной работы цикла при уменьшении ν). При этом достигается значение η_i около 50 %.

С целью дальнейшего повышения экономичности целесообразно использовать двухступенчатое сжатие с охлаждением гелия перед компрессором второй ступени и теплообменники для нагрева сетевой воды вместо конечного охладителя технической водой.

Однако применение регенерации и двухступенчатого сжатия усложняют и удорожают технологическую схему энергоблока ГТУ. Поэтому выбор оптимального варианта может быть корректно сделан только на основании технико-экономических расчетов.

Литература

1. **Перспективные** ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения: учебное пособие / В.И. Бойков, Д.Г. Демянюк, Ф.П. Кошелев и др. Томск.: Издательство ТПУ, 2006. 489 с.

*В.С. Кузьмин, И.О. Луцик, Д.В. Посохов, студенты;
рук. А.О. Семёнов, ст. преп. (НИ ТПУ, г. Томск)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РАЗБАВЛЕНИЯ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ Ni_2Al_3 , ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ РАО В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ

Проблема обращения с РАО является одной из наиболее важных в ядерной отрасли. Для обеспечения их безопасного хранения используются различные технологии иммобилизации РАО в новые стабильные матричные материалы, которые должны обладать определенным набором химических и физических характеристик.

В качестве материала для матрицы был выбран обладающий необходимыми свойствами алюминид никеля. Для проведения эксперимента по получению матрицы были использованы соответствующие порошки из расчета на прохождение следующей реакции:



В качестве имитатора радиоактивных отходов был выбран порошокобразный неодим в виде оксида Nd_2O_3 , который по своим химическим свойствам наиболее близок к актиноидам. Массовая доля добавки оксида неодима составляла от 5 до 80 %. При исследовании пределов разбавления образцов выяснилось, что максимальная степень разбавления образца составляет около 70 % (по массе) при превышении данного значения происходит затухание распространения волны горения, и реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза прекращается.

Анализ полученных данных показал, что в образцах с массовой долей оксида неодима, равной 20 % и выше, происходит образование дополнительных фаз: оксида алюминия, алюминида неодима и перовскита на основе алюминия, который является синтетическим аналогом природного минерального соединения, — обладающих высокой стойкостью к выщелачиванию и коррозии. При увеличении количества добавки до 30 % и более фазообразование смещается в сторону образования оксидов алюминия, что приводит к такому негативному эффекту, как повышенная охрупчиваемость.

Литература

1. **Скачек М.** Обращение с отработавшим топливом и радиоактивными отходами АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.

*В.С. Кузьмин, И.О. Луцик, Д.В. Посохов, студенты;
рук. А.О. Семёнов, ст. преп. (НИ ТПУ, г. Томск)*

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ

Одним из долгосрочных и опасных последствий ядерных программ является накопление все возрастающих объемов радиоактивных отходов. В настоящее время активно продолжается поиск новых иммобилизационных материалов, позволяющих на протяжении длительного времени надежно изолировать радионуклиды от окружающей среды [1].

Следует выбирать материалы матрицы исходя из физико-химических и механических свойств, предъявляемых к данным материалам. В данной работе рассматривается получение матричного материала на основе алюминид никеля.

Шихта для проведения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза готовилась из расчета на прохождение следующей экзотермической реакции:



При исследовании полученных образцов была определена зависимость влияния давления прессования на фазообразование матрицы. В образцах, полученных путем прессования шихты в цилиндрические таблетки при давлении прессования, равном 30 кгс/см^2 , наблюдается формирование двух фаз Ni_2Al_3 и NiAl ; в образцах, полученных при давлении прессования 40 кгс/см^2 и выше, происходит образование только стехиометрической фазы NiAl вследствие увеличения теплового эффекта реакции синтеза, минуя стадию образования фазы Ni_2Al_3 . Изменение фазового состава в сторону уменьшения 3-валентного алюминид никеля приводит к снижению прочностных характеристик матричного материала из-за снижения искажения кристаллической решетки системы.

Литература

1. **Итин В.И., Найбороденко Ю.С.** Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во ТГУ, 1989. 214 с.

*И.И. Лебедев, М.Н. Аникин, аспиранты;
рук-ли Ю.Б. Чертков, к.ф.-м.н., доц.; А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доц.
(НИ ТПУ, г. Томск)*

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ТОРИЯ В СЕРИЙНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Разведанные запасы тория в земной коре в несколько раз превышают запасы урана, что потенциально существенно увеличивает сырьевую базу ядерной энергетики в случае использования замкнутого ядерного топливного цикла [1].

В настоящей работе представлено расчетное исследование возможности использования различных топливных композиций на основе тория в реакторе ВВЭР [2]. Для этих целей была разработана расчетная модель твэла реактора ВВЭР-1000 в программе WIMS-ANL, была проведена верификация модели путем сравнения полученных результатов с расчетами в прецизионной программе MCU [3].

Были определены основные особенности применимости торийсодержащих материалов в работе ядерного реактора. Показано, что торий-232 является лучшим «сырьевым» изотопом по сравнению с ураном-238 для реакторов с тепловым спектром нейтронов, поскольку уран-233 испускает более двух нейтронов в расчете на один захват первичного нейтрона для широкого набора реакторов с тепловым спектром нейтронов, что является лучшим показателем для делящихся изотопов.

Рассмотрены перспективные виды ядерного топлива, такие как смесь оксида урана и оксида тория, смесь оксида тория и оружейного плутония и смесь оксида тория и энергетического плутония. Приведены достигаемые значения глубины выгорания при использовании различных видов топлива. Оценена степень вовлечения воспроизводящих нуклидов в топливный цикл в течение кампании топливной сборки.

Литература

1. **Торий** в ядерном топливном цикле / В.И. Бойко и др. // М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2006.
2. **Belle J., Berman R.M.** Thorium dioxide: properties and nuclear applications. — USDOE Assistant Secretary for Nuclear Energy, Washington, DC. Office of Naval Reactors, 1984. № DOE/NE-0060.
3. **WIMS-ANL** User Manual, Rev. 2 / J.R. Deenet et al. ANL/RERTR/TM-23, 1998.

*П.А. Молодов, студ.; М.Н. Аникин, асп.;
рук. А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доц. (НИ ТПУ, г. Томск)*

СОЗДАНИЕ ТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ИРТ-Т В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Настоящий доклад посвящен проведению расчетных исследований нейтронно-физических и теплофизических процессов в исследовательском реакторе ИРТ-Т. В настоящее время проводится модернизация активной зоны реактора, что приведет к изменению параметров нейтронных и температурных полей. Разработанная модель позволит проводить оценочные расчеты интересующих характеристик реактора для решения оптимизационных задач.

На основе программной среды MATLAB/Simulink [1] создан расчетный инструмент, предназначенный для анализа динамического реагирования системы первого контура реактора ИРТ-Т. Среда дополнена библиотекой расчетных модулей, в которой представлены модели точечной кинетики с шестью группами запаздывающих нейтронов и одномерная динамическая модель теплофизических процессов [2] с учетом температурного эффекта реактивности и естественной циркуляции теплоносителя в корпусе реактора.

Верификация расчетной модели проводилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на реакторе ИРТ-Т [3] при вводе реактивности на уровнях мощности 12, 100 кВт, 3 МВт. В качестве эталонного значения были приняты изменения положения стержней системы регулирования во время переходных процессов. Анализ полученных результатов показал, что разработанная расчетная модель качественно правильно описывает изменение мощности реактора в ходе экспериментов, погрешность в распределении мощности составила менее 1 % для трех переходных процессов.

Литература

1. **The Mathworks.** SIMULINK, Dynamic System Simulation Language User's Guide, 2008a.
2. **Чертков Ю.Б., Наймушин А.Г.** Использование программы TRACE для создания теплогидравлической модели реактора ИРТ-Т //Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4.
3. **Исследование** распределения поля энерговыделения в реакторе ИРТ-Т при различном положении стержней регулирования / А.Г. Наймушин и др. //Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11—2. С. 353—359.

*Е.Д. Морару, В.А. Дунаев, студенты; Н.А. Лоншаков, асп.;
рук. В.А. Горбунов, д.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

В 2013 г. ОАО «Концерн Росэнергоатом» прошел сертификацию на соответствие требованиям международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению». Данный стандарт обязывает руководство российских АЭС проводить мероприятия, направленные на снижение затрат тепловой и электрической энергии, отводимой на собственные нужды станции [1].

Одним из объектов, потребляющих энергию собственных нужд станции, является турбопитательный насос АЭС. Для анализа его работы построена математическая модель, основанная на нейросетевых технологиях [2]. Исходными данными для построения модели являлись массивы тепло-технологических параметров, полученных в процессе эксплуатации турбопитательного насоса.

В ходе анализа выявлены наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на эффективность работы исследуемого турбопитательного насоса, получены технически обоснованные нормы расхода тепловой энергии пара. Построенная математическая модель турбопитательного насоса обладает погрешностью не более 3 %. Результаты проделанной работы объединены в программный комплекс, написанный на языке Microsoft, позволяющий в доступной форме получать интересующую информацию.

В итоге разработана инновационная технология, позволяющая проанализировать эффективность эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС, давать рекомендации по рационализации режимов его работы, определять технически обоснованные нормы расхода тепловой энергии пара.

Литература

1. **Приложение № 2** к приказу ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 15.11.2013 № 9/1055-П «Стратегические цели и цели в области энергоэффективности на среднесрочную перспективу».

2. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2011. 475 с.

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

НАВОДОРОЖИВАНИЕ СТАЛИ МАРКИ 10ГН2МФА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ

Водород очень активно проникает внутрь большинства металлов и сплавов. Поглощенный сталью водород может находиться в трех состояниях: в ионизированном (протоны) — растворен в решетке, в молекулярном — локализован и хранится в необратимых ловушках (порах, вакансиях, дислокациях и по границам зерен) и в виде гидридов компонентов сплавов. Проблема учета влияния водорода на свойства металлов и сплавов является научно-технической проблемой.

Концентрация водорода — это мера коррозионно-статического повреждения. При достижении определенной концентрации водорода в стали марки 10ГН2МФА (критерий предельного состояния по наводороживанию) наступает локальное предельное состояние, после чего зарождается и растет коррозионно-статическая трещина. В данной работе разработана методика обработки экспериментальных данных по наводороживанию стали марки 10ГН2МФА при низкотемпературном отжиге (НТО).

Накопление водорода в металле после НТО описывается по формуле:

$$C_H(\tau_i) = k'((\tau_{hi})_{НТО} + \Delta\tau_i)^{0.5} \exp(-q \cdot p \cdot H_i), \quad (1)$$

где $k' = k/K_{t-НТО}^{0.5}$; $K_{t-НТО}$ — коэффициент, учитывающий снижение скорости генерации электролитического водорода вследствие уменьшения скорости коррозии под напряжением; $(\tau_{hi})_{НТО} = [(C_{H(i-1)} - C_H^П)/(k' \cdot \exp(-q \cdot p \cdot H_i))]^2$ — экспозиция от НТО до момента исследования; $C_H^П$ — величина, на которую уменьшилась концентрация водорода в металле из-за НТО (эквивалентна содержанию растворенного в кристаллической решетке атомарного водорода (немолизованного, в виде протонов)); k, q — постоянные, определяемые при обработке данных целевых экспериментов; $\Delta\tau_i$ — интервал времени наблюдений между двумя последовательными измерениями.

В работе представлены результаты проведенных лабораторных испытаний, имитирующих НТО коллекторов ПГВ-1000 на разных стадиях жизни, и результаты измерения концентрации водорода C_H в образцах стали 10ГН2МФА. На основе результатов экспериментов проведен расчет накопления водорода в стали 10ГН2МФА по формуле (1). Сопоставление результатов расчетов и измерений концентрации водорода C_H показало, что среднее квадратичное отклонение лежит в пределах 8,9—24,82 %, что вполне приемлемо для многофакторных процессов типа наводороживания.

*А.А. Нерода, студ.; И.И. Лебедев, асп.;
рук. Ю.Б. Чертков, к.ф.-м.н., доц. (НИ ТПУ, г. Томск)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАНАЛАХ РЕАКТОРА ИРТ-Т

Важнейшей характеристикой исследовательского реактора является распределение плотности потока нейтронов в объеме экспериментальных каналов [1].

Одним из процессов, предъявляющих жесткие требования к степени однородности поля нейтронов, является нейтронно-трансмутационное легирование кремния [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности формирования нейтронных полей в экспериментальных каналах с использованием перспективных соединений на основе бериллия, таких как бериллиевое стекло и оксид бериллия [3].

В рамках проведенной работы разработана модель активной зоны реактора ИРТ-Т, позволяющая проводить исследования характеристик экспериментальных каналов с учетом геометрических и материальных особенностей элементов отражателя.

Показана возможность формирования распределения плотности потока нейтронов в экспериментальном канале исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т с высокой степенью однородности при компоновке отражателя комбинированного состава. Проведены расчетные исследования, обосновывающие экономическую выгоду использования альтернативной компоновки отражателя для проведения нейтронно-трансмутационного легирования кремния в экспериментальных каналах реактора.

Литература

1. **Смирнов Л.С.** Атомные процессы в полупроводниковых кристаллах // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. №. 9.
2. **Головацкий А.В., Варлачев В.А., Солодовников Е.С.** Установка для нейтронного легирования кремния на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т // Современные техника и технологии: сб. тр. XIX Межд. НТК студентов и аспирантов и молодых ученых. Томск: НИТПУ, 2013. Т. 3. С. 12, 13.
3. **Naymushin A.** et al. Degradation of Beryllium Reflector Properties on the IRT-T Reactor //Advanced Materials Research. 2015. Т. 1084. С. 289—293.

О РАСХОДЕ ТЕПЛОТЫ НА ТЕПЛОФИКАЦИЮ

В таблице приведены результаты расчета двух режимов работы паротурбинной установки АЭС на насыщенном паре. Первый режим чисто конденсационный, второй — с теплофикационной нагрузкой. Параметры тепловой схемы, кроме расходов рабочего тела, в этих расчетах не изменялись.

Режим ПТУ	Q_0 , МВт	D_0 , кг/с	N_3 , МВт	Q_T , МВт	$\eta_э$, %	$\eta_{эТ}$, %
1	3195,4	1750	1091,3	0	34,75	-
2	3286,6	1800	1091,3	150	35,43	37,77

Видно, что во втором режиме выработка тепловой мощности Q_T при неизменной электрической мощности N_3 потребовала увеличения расхода теплоты на турбоустановку Q_0 всего на 91,2 МВт, пара на турбину D_0 — на 2,86 %. Разница между $Q_T = 150$ МВт и $\Delta Q_0 = 91,2$ МВт подтверждает энергетическую эффективность совместного производства электроэнергии и теплоты в паротурбинной установке. По сравнению с конденсационным режимом увеличился электрический КПД $\eta_э$, а также КПД по преобразованию подведенной энергии Q_0 в полезные виды энергии $\eta_{эТ}$.

В соответствии с физическим методом распределения теплоты на производство каждого вида энергии, на производство 150 МВт теплоты не может быть затрачена меньшая мощность. Таким образом, вся выгода от совместного производства относится к электроэнергии. Приведенные данные, на наш взгляд, опровергают корректность физического метода. Для распределения расхода теплоты (или расхода топлива) между произведенными электрической и тепловой энергиями необходим другой подход. На это есть указания во многих публикациях, например в [1].

Литература

1. Калинов В.Ф., Киселев Г.П. Опыт внедрения новой методики расчета показателей тепловой экономичности ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 1998. № 1.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОДНОМЕРНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ КРИВОЙ КИПЕНИЯ В ОБЛАСТИ ФРОНТА ПОВТОРНОГО СМАЧИВАНИЯ

Хотя исследованиям нестационарной теплоотдачи в области кондуктивно-конвективного фронта повторного смачивания (ФПС) и скорости фронта (U) более 50 лет, однако в расчетных кодах «улучшенной оценки», используемых для анализа безопасности АЭС, до сих пор нет единого подхода в решении этой задачи.

В работе [1] представлено полуэмпирическое решение для U и максимального теплового потока (q_{\max}) в ФПС в диапазоне между стационарными табличными значениями критического теплового потока q_1 и минимальным тепловым потоком при пленочном кипении q_2 , определяемым по известной зависимости:

$$\frac{q_1 - q_{\max}}{q_1 - q_2} = U / U_{\text{пред}}, \quad (1)$$

при использовании одномерного решения для q_{\max} :

$$q_{\max} = (\rho c \delta)_w U (\partial T_w / \partial z)_{\max} + q_{\Gamma}, \quad (2)$$

где индекс w — относится к стенке канала, а q_{Γ} — генерируемая (или подводимая) тепловая нагрузка.

В нашей работе вместо правой части в (1) принимается отношение текущей нестационарности $U (\partial T_w / \partial z)_{\max}$ к предельной $q_2 / (\rho c \delta)_{w, \min}$, получаемой также из (2) при $q_{\max} = q_2$, $q_{\Gamma} = 0$, а $(\rho c \delta)_{w, \min} = (\rho c \delta)_w (U / W_{\text{ж}})$, что следует из равенства чисел Пекле (Pe) в текущих и предельных условиях ($W_{\text{ж}}$ — истинная скорость жидкой фазы).

Используя (2), (1) и нашу новую безразмерную нестационарность (в правой части (1)), получаем решение (1) для $U = U (\partial T_w / \partial z)_{\max}$, а значит, и для $q_{\max} = U (\partial T_w / \partial z)_{\max}$. Для расчета теплоотдачи во всей области ФПС необходимо знать значение U и граничных условий $(\partial T_w / \partial z)_{\text{фр}}$.

Сравнение опытных данных по q_{\max} и U показывает удовлетворительную работоспособность данного аналитического решения.

Литература

1. Хасанов Р.Х. Метод определения деформации кривой кипения во фронте повторного смачивания // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. научных трудов. М.: МЭИ, 1999. С. 82—84.

А.А. Сливин, студ.; М.Н. Аникин, асп.;
рук. Ю.Б. Чертков, к.ф.-м.н., доц. (НИ ТПУ, г. Томск)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР

Главным направлением совершенствования топливного цикла реакторов водо-водяного типа является увеличение длины кампании реактора, которое осуществляется путем повышения начального обогащения топлива. Однако это влечет за собой необходимость компенсации высокой избыточной реактивности в начале топливных циклов, что достигается при помощи введения выгорающих поглотителей (ВП). Использование ВП позволяет снизить нагрузку на компенсирующие стержни и выравнять распределение энерговыделения по объему активной зоны реактора [1].

В качестве выгорающих поглотителей целесообразно использование элементов группы лантаноидов Eu, Sm, Dy, редкого элемента Hf, рассеянного элемента Cd, некоторых изотопов нептуния, америция, кюрия, плутония, частичного ториевого цикла. Кроме выбора материала важен выбор способа размещения поглотителя в топливной сборке. В работе рассматриваются такие расположения ВП, как гомогенное размещение, гетерогенное размещение в центре топливной таблетки в виде проволоки, размещение в виде напыления [2].

При добавлении в условиях замкнутого топливного цикла энергетического плутония к обогащенному урану в количестве 1,6 % тяжелых атомов ведет к снижению реактивности в начале кампании, позволяет увеличить глубину выгорания топлива на несколько процентов от начальной величины глубины выгорания в 60 МВт·сут/кг [3].

Использование смеси трансурановых элементов в качестве выгорающего поглотителя в условиях замкнутого топливного цикла не приводит к увеличению глубины выгорания к концу кампании, однако является привлекательным с точки зрения их полезной утилизации [3].

Литература

1. Чертков Ю.Б., Наймушин А.Г., Монгуш С.А. Альтернативное размещение выгорающих поглотителей в реакторе ВВЭР-1000 // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 2/2. С. 57—62.
2. WIMSD-IAEA Library [электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/Pages/wimsd-iaea-library.aspx> (дата обращения: 18.09.2015)
3. Широков С.В., Заец В.В. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с различными выгорающими поглотителями // Ядерна та радіаційна безпека. 2011. № 4(52).

*А.М. Теплов, Д.А. Медников, студенты; рук. В.К. Семёнов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛЬ ДВУХТОЧЕЧНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКСИАЛЬНЫХ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В реакторах больших размеров с неравномерным распределением нейтронного потока возможно возникновение ксеноновых колебаний и волн [1].

Исследование ксеноновой устойчивости и математическое моделирование ксеноновых колебаний и волн позволяют определить теплотехническую надежность активной зоны ядерного реактора и поэтому являются весьма актуальными. В настоящее время не существует единого подхода, позволяющего определить характер ксеноновых колебаний и оценить устойчивость реактора. При разработке алгоритма симуляции ксеноновых колебаний использована модель связанных реакторов, математическое моделирование и численные методы интегрирования жестких дифференциальных уравнений в среде программирования Mathcad [2, 3]. В результате создана математическая модель связанных реакторов и выполнены численные эксперименты по моделированию ксеноновых колебаний в выше-названной системе, позволяющие определить выбег мощности и температурный перегрев активной зоны. Построение модели и формализация связей между ее элементами позволяет устранить пробелы в знаниях об объекте и выявить новые качественные проблемы, которые изначально не могли быть предусмотрены.

Проведены численные эксперименты, позволившие определить область ксеноновой устойчивости ядерного реактора, а также количественно исследовать ряд важных для теории и практики нейтронно-физических процессов в ядерном реакторе. Результаты математического моделирования и численные эксперименты могут быть использованы в учебном процессе для определения области безопасной работы ядерного реактора при разработке алгоритмов предупреждения и подавления ксеноновых колебаний.

Литература

1. **Семёнов В.К.** Кинетика и регулирование ядерных реакторов. Иваново, ИГЭУ, 2009.
2. **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.
3. **Данейкин Ю.В.** Математическое и физическое моделирование ядерного реактора: учебное пособие / Ю.В. Данейкин, А.В. Хадкевич, К.В. Юшицин. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. 96 с.

Чжоу Пэнчао, асп.; рук. В.П. Горбатов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

НАРАБОТКА ДО ПЕРВОГО ОТКАЗА ТРУБНОГО ПУЧКА ПО УСЛОВИЯМ УСТАЛОСТИ И КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ (КР)

Как известно, парогенератор (ПГ) — одна из наиболее ответственных частей атомной электростанции (АЭС). С целью повышения надежности ПГ, а также увеличения его срока службы в процессе производства и эксплуатации был внесен ряд изменений и усовершенствований. Одна из проблем при эксплуатации АЭС — это повреждение элементов ПГ, в том числе теплообменных труб (ТОТ).

В НИУ «МЭИ» на основе теории кинетической прочности материалов разработана следующая формула наработки трубным пучком ПГ до первого отказа [1]:

$$\ln \tau_{\text{к.р}} = \ln L - 17,79 - \frac{1}{2} \ln C_{\text{O}_2} - \frac{3}{2} \ln C_{\text{Cl}^-} + \ln \left[\exp \left\{ \frac{U_0}{RT} - \frac{(\sigma/2 - \alpha G \bar{b} \sqrt{\rho}) N_{\text{ф.ш}} \gamma}{RT} \right\} + \exp \left\{ \frac{U_0}{RT} - \frac{(\sigma/2 + \alpha G \bar{b} \sqrt{\rho}) N_{\text{ф.ш}} \gamma}{RT} \right\} \right],$$

где L — толщина стенки ТОТ; U_0 — энергия связи; R — универсальная газовая постоянная; T — температура; σ — механическое напряжение; ρ — плотность дислокаций; α — коэффициент; G — модуль упругости, Н/м²; $\bar{b} = 2,53 \cdot 10^{-10}$ м — вектор Бюргера; $N_{\text{ф.ш}}$ — число Авогадро по физической шкале; γ — активационный объем.

На основе анализа этой зависимости нами разработано направление дальнейшего развития параметрической модели — создание алгоритма учета негативного совместного действия факторов на наработку до образования трещин под действием по крайней мере двух факторов — усталости и КР.

Литература

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

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

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ АВАРИЙ НА АЭС НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИХ ПРОТЕКАНИЯ

В докладе представлена система идентификации аварий на разных этапах их протекания на АЭС.

При нормальной работе АЭС, и тем более в случае аварии, происходит сложное взаимодействие различного оборудования и физических процессов, что определяет очень нетривиальное поведение как отдельных элементов станции, так и всей системы в целом. Поток информации, поступающий к оператору, характеризуется многомерностью, взаимовлиянием между компонентами, наложением стохастических погрешностей, что затрудняет правильную идентификацию состояний системы, прогнозирование и планирование эффективных противоаварийных мероприятий.

Имеющиеся системы поддержки оператора обычно базируются только на идентификации предаварийной ситуации и факте возникновения аварии. Также в них в основном рассматривается только начало аварии и учитывается относительно небольшое количество возможных вариантов. Однако для принятия эффективных противоаварийных мероприятий необходима система, позволяющая не только сигнализировать о возникновении аварии, но также распознавать ее тип, иметь возможность настраиваться на любое количество возможных ситуаций.

Для решения этой проблемы в докладе рассмотрено построение системы идентификации аварии с применением нейронных сетей. В процессе разработки делался специальный акцент на возможности ее успешного функционирования на всех этапах развития аварии на АЭС.

В докладе представлена архитектура разрабатываемой системы, основные этапы ее построения и настройки. В частности, рассматриваются вопросы формирования базы данных на основе большого количества возможных аварий для РУ ВВЭР-1000/В320, включая шаги, необходимые для тренировки нейронных сетей, ее настройку и проверку, а также функционирование для различных этапов развития аварий в течении моделируемых 6000 с.

В докладе анализируется проблема возможного разветвления аварии на различных ее этапах при дополнительных отказах, например, компонент систем безопасности. Для успешной идентификации в любой момент времени протекания аварии была разработана специальная иерархическая архитектура, учтено влияние стохастических характеристик.

ВЕРИФИКАЦИЯ И ИНТЕГРИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ЕВКЛИД» ДИФFUЗИОННОЙ ОПЦИИ С КИНЕТИЧЕСКИМИ ПОПРАВКАМИ

В нейтронно-физическом коде DN3D, интегрированном в интегральный комплекс ЕВКЛИД, используется расчетная модель РУ на быстрых нейтронах, в соответствии с которой активная зона представляется в виде совокупности расчетных объемов, образующих регулярную гексагональную решетку в плоскости (X,Y) с равномерным шагом по высоте активной зоны [1].

Распределение потока нейтронов описывается нестационарным интегро-дифференциальным уравнением переноса нейтронов с запаздывающими нейтронами и обратными связями по теплогидравлическим параметрам. В диффузионной опции нейтронно-физического кода DN3D реализовано решение этого уравнения в диффузионном приближении, которое получается интегрированием данного уравнения по угловой переменной и введением замыкающего соотношения, связывающего ток нейтронов и градиент потока нейтронов соотношением

$$J(r, E, t) = -D(r, E, t) \nabla \Phi(r, E, t). \quad (1)$$

Коэффициент диффузии определяется в рамках P₁-приближения соотношением

$$D_m^g = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^g}. \quad (2)$$

Такое определение коэффициента диффузии справедливо для однородных сред, где допускается разложение потока нейтронов по сферическим функциям. Вблизи границ гетерогенности такое разложение невозможно, поскольку на границе гетерогенности угловое распределение терпит разрыв.

В данной работе разрабатывается и реализуется методика введения кинетических поправок в диффузионную модель, основанная на определении коэффициента диффузии вблизи границ гетерогенности соотношением

$$D(r, E, t) = -\frac{J(r, E, t)}{\nabla \Phi(r, E, t)}, \quad (3)$$

где ток нейтронов и градиент потока нейтронов вблизи границ гетерогенности определяются из решения модельной задачи Sn-методом. Данная методика позволит проводить более точные расчеты кампаний реакторов на быстрых нейтронах.

Литература

1. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.

ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОБМЕНА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

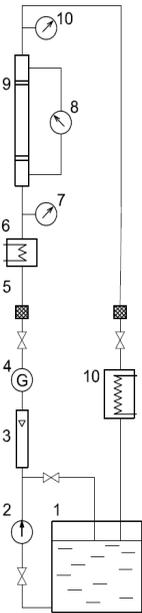


Рис. 1. Гидравлический контур

Атомная энергетика — единственная динамично развивающаяся отрасль энергетики способная на практическом уровне заменить традиционную тепловую энергетику с ее исчерпаемыми запасами топлива. Одним из путей решения этой проблемы является использование тепловыделяющих сборок с микротрещинами (ТВС МТ), непосредственно охлаждаемых теплоносителем [1]. Конструкция ТВС МТ будет гарантировать новый уровень безопасности и повышение основных технико-экономических показателей энергетических установок.

Работа проведена на экспериментальном стенде, позволяющем моделировать однофазное течение теплоносителя в микротрещинной шаровой засыпке.

Циркуляция теплоносителя (дистиллированная вода) в гидравлическом контуре (рис. 1) осуществляется многоступенчатым центробежным насосом. Рабочий участок (9) моделирующий засыпку микротрещин, заполнен шариками из нержавеющей стали диаметром 2 мм. Индукционный нагрев засыпки осуществлялся с помощью ВЧ-генератора с тепловой мощностью до 12 кВт. Измерение температуры проводилось с помощью хромель-алюмелевых термопар, расположенных до, после и

непосредственно в шаровой засыпке рабочего участка. Расход контролируется электромагнитным расходомером (4) и ротаметром (3). Для измерения давления на рабочем участке используются стрелочные манометры (7, 10) и датчик перепада давления (8).

В ходе исследований был обработан большой массив экспериментальных данных, получены зависимости гидравлического сопротивления и коэффициента теплоотдачи от числа Re .

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

Литература

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

С.О. Гарькавый, асп.; рук. В.Л. Матухин, д.ф-м.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ОКСИДЫ СО СТРУКТУРОЙ ДЕЛАФОССИТА

В настоящее время активно исследуются полупроводниковые соединения — прозрачные проводящие оксиды с проводимостью *p*-типа (*p*-ППО). К ним относятся соединения типа CuMO_2 , где М — Al, Ga, In, имеющие кристаллическую структуру делафоссита. Слоистая структура соединений позволяет вводить в нее различные функциональные группы. Интерес к этим полупроводникам связан с перспективными разработками в области так называемой «невидимой электроники»: соединения CuMO_2 имеют высокую оптическую прозрачность и большую электрическую проводимость. Особый интерес представляют термоэлектрические свойства этих соединений [1].

В данном докладе представлены результаты изучения спектров ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) $^{63,65}\text{Cu}$ в образцах полупроводникового соединения CuAlO_2 . Исследованные образцы были получены методом твердофазного синтеза. Повышение эффективности твердофазного синтеза достигалось непрерывным ЯКР-контролем получаемых на различных этапах синтеза продуктов. Измерения проводились на многоимпульсном спектрометре ЯКР Tescmag-Redstone. Времена ядерной спин-решеточной релаксации обоих изотопов меди измерялись методом «инверсия-восстановление» с последующей регистрацией кинетической кривой восстановления равновесного значения ядерной намагниченности. Интенсивность сигналов спинового ЯКР-эха измерялась в зависимости от временной задержки после начального инвертирующего 180° импульса. При этом релаксационная функция имеет сравнительно больший размах, чем при использовании метода «насыщение-восстановление», что существенно при малом отношении сигнал/шум. Измерения формы линий ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ осуществлялись с использованием квадратурного детектирования путем записи квадрупольного спинового эха с пошаговым прохождением частотного диапазона и накопления сигналов. Релаксационные скорости в CuAlO_2 содержат вклады от магнитных и квадрупольных релаксационных механизмов. Магнитный вклад в релаксационную скорость обусловлен магнитными сверхтонкими полями мобильных дырок. Анализ полученных спектров позволил сделать предположение о дефектной структуре кристаллов.

Литература

1. Banerjee A.N., Chattopadhyay K.K. //Appl. Phys. 2005. Vol. 97. № 8. P. 84308.

*М.С. Егин, Н.Х. Буй, студенты; рук. А.В. Елецкий, д.ф.-м.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАФЕНА ИЗ ОКСИДА ГРАФЕНА ТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Исследованию свойств графена посвящено большое количество научных работ, например [1], поэтому разработка новых, более доступных и простых методов его получения актуальна в настоящее время. Это будет способствовать получению новых экспериментальных данных об этом материале и развитию технологий, основанных на его использовании.

Новизна проводимых исследований заключается в разработке нового метода получения графена, более простого и, с другой стороны, менее повреждающего материал, чем химическое восстановление из оксида графена. Сущность данного метода состоит в термической обработке оксида графена, получение которого в больших количествах возможно при использовании метода Хаммерса. Образец имеет тканеподобную структуру, состоящую из множества листов оксида графена. Термическая обработка производится в автоматизированной установке Planar Tech производства Южной Кореи. Контроль за процессом восстановления проводится на основании измерений проводимости с учетом того обстоятельства, что проводимость графена на 8—10 порядков превышает соответствующее значение для проводимости оксида графена.

Целью работы является установление оптимального режима восстановления (температуры и длительности термической обработки). Были получены экспериментальные данные о проводимости и других свойствах оксида графена и восстановленного графена.

Перспективой использования полученных результатов является внедрение нового метода восстановления графена в исследовательскую практику, что позволит исследователям получать менее поврежденные при восстановлении образцы графена более простым и доступным методом. Это положительно повлияет на темп исследований в данной области и получение новых экспериментальных данных.

Литература

1. **Елецкий А.В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 3. С. 233—274.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ И СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ СЛОЯМИ

Сверхпроводники и ферромагнетики имеют противоположные магнитные свойства, если в ферромагнетик магнитное поле проникает беспрепятственно, то сверхпроводник его полностью вытесняет. В наноструктурах с чередующимися ферромагнитными и сверхпроводящими слоями, при условии, что толщины слоев порядка сверхпроводящей корреляционной длины, сверхпроводящий параметр порядка проникает в ферромагнетик, также в свою очередь магнитный параметр порядка может проникать в сверхпроводник. При этом в ферромагнитном слое возможно возникновение особой доменной структуры (криптоферромагнитное состояние), характерный размер которой 1—100 нм, в то время как характерный размер классических доменов ферромагнетика 1—100 мкм. Такое состояние ферромагнитного слоя, контактирующего со сверхпроводником, предсказано теоретически [1—3], но экспериментально не обнаружено.

Большие возможности для исследований магнетизма наноструктур открывает метод рефлектометрии поляризованных нейтронов. Зависимость коэффициента отражения от переданного волнового вектора при различных входных и выходных поляризациях нейтрона может дать информацию о магнитном и ядерном профиле структуры. Малоугловое рассеяние и дифракция в плоскости, перпендикулярной плоскости отраженного пучка, могут дать информацию о неоднородностях с характерным размером 1—1000 нм, что соответствует размеру криптоферромагнитных доменов.

В работе исследовались наноструктуры с ферромагнитными слоями из Fe толщиной 1 нм, контактирующими со сверхпроводящими слоями из V и Nb. Нейтронные исследования показали, что в ферромагнитных слоях возникает магнитная решетка при температуре около 150 К, далее при переходе Nb в сверхпроводящее состояние при 8 К сверхпроводимость модифицирует сформированную магнитную решетку, при этом уменьшается период решетки и размер домена, который соответствует предсказанному теоретически характерному размеру криптоферромагнитного домена.

Литература

1. P.W. Anderson and H. Suhl // Phys. Rev. 116 (1959) 898.
2. A.I. Buzdin, L.N. Bulaevski // Sov. Phys. JETP 94, 256-261 (1988).
3. F.S. Bergeret, K.B. Efetov, A.I. Larkin // Phys. Rev. B, 62(17)(2000)11872.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА АРГОНОДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

Аргонодуговые плазмотроны широко используются во многих плазменных технологических процессах. Одной из актуальных задач [1] при проектировании и использовании дуговых плазмотронов является увеличение продолжительности его работы, которая зависит прежде всего от тепловой нагрузки катода.

Целью работы являлось экспериментальное определение температуры поверхности катода, изготовленного из вольфрама марки ВТ-15. Общая оптическая схема измерения представлена на рис. 1. Изображение рабочей части катода оптической линзой в увеличенном масштабе ($\Gamma = 5$) формируется на входном торце ВОК, установленного на трехкоординатном столе с возможностью перемещения по координатам x и y с шагом 8 мкм, равным диаметру ВОК. Далее световой поток передается в спектрометр Avaspec. Нейтральный неселективный светофильтр НС необходим для ослабления светового потока с целью исключения перегрузки матричного фотоприемника. Измерения проводятся в различных точках поверхности катода в режиме абсолютной интенсивности. На основе этих данных при дальнейшей обработке вычисляется температура.

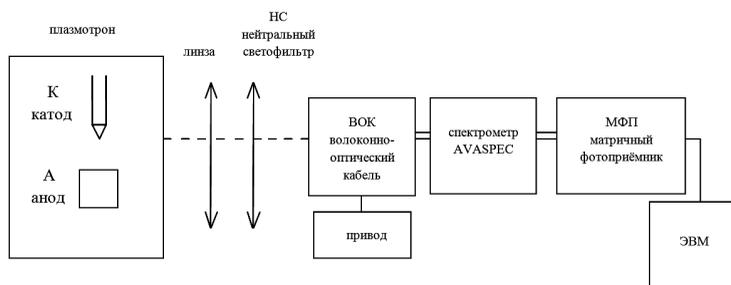


Рис. 1. Схема измерения распределения температуры по поверхности катода аргонодугового плазмотрона

В данной работе собрана и отлажена экспериментальная установка. Получены данные, которые будут использоваться в дальнейшем при анализе тепловых нагрузок.

Литература

1. **Investigation** of Thermoemission Cathodes of the Arc Plasma Torches at Atmospheric Pressure / S. Nguyen-Kuok, V. Chinnov, Yu. Malakhov, I. Korotkikh // Proc. of the XXXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG–2015), Antwerp, Belgium, July 05 — 10, 2015.

А.А. Курило, асп.; М.Г. Стрижаков, соиск.; Е.В. Убасев, студ.;
рук. Е.Д. Казаков, к.ф.-м.н., доц. (НИУ «МЭИ»,
НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ «КАЛЬМАР»

Регистрация рентгеновского излучения имеет большое значение при исследовании взаимодействия сильноточных электронных пучков с твердотельными мишенями. Длительность импульса тормозного рентгеновского излучения жестко коррелирует с длительностью взаимодействия пучка с мишенью. Это особенно важно при исследовании плазменных процессов в диоде ускорителя.

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар», который обеспечивает ток $I = 30$ кА при энергии электронов $E = 0,3$ МэВ и длительности импульса на полувысоте $\tau = 10^{-7}$ с [1]. Основным элементом ускорителя является двойная формирующая линия (ДФЛ) с электрической длиной 70 нс, заряжаемая от генератора импульсов напряжения (ГИН).

Для измерений тормозного рентгеновского излучения использовался детектор ССДИ-8, состоящий из быстрого коаксиального фотоэлемента (ФЭК) с установленным перед ним сцинтиллятором.

В связи с конструктивными особенностями электрической схемы ускорителя в экспериментальном зале установки во время выстрела очень велик уровень электромагнитных наводок. Поэтому измерительный тракт необходимо было прокладывать в специальных экранах.

В работе представлены первые экспериментальные результаты, полученные при использовании мишеней с различными значениями массового числа Z .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-02-03544-а.

Литература

1. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А. и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 100—104.

*Д.В. Никоноров, студ.; рук. А.В. Лубенченко, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА НИОБИЯ МЕТОДОМ РФЭС

Интерес к ниобию и его различным соединениям вызван уникальными сверхпроводящими свойствами этих соединений. Например, на основе пленок нитрида ниобия созданы однофотонные детекторы с высоким временным разрешением. Один из методов исследования таких пленок — это метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия позволяет получить данные по элементному и химическому составу поверхностного слоя толщиной в несколько десятков атомных монослоев. Высокое разрешение по энергиям регистрируемых электронов позволяет определять даже незначительные сдвиги пиков, связанные с изменением химического состояния атомов, что в комбинации с послойным анализом с использованием ионного травления позволяет исследовать тонкие поверхностные слои [1]. Однако широко используемые программы анализа спектров РФЭС не способны качественно разбивать спектры на составляющие их пики, что приводит к значительным ошибкам.

В работе получил развитие метод разложения фотоэлектронных спектров, который учитывает тип линий, дуплетную структуру пиков, химический сдвиг, сателлитные пики. Были проанализированы экспериментальные данные по химическому сдвигу различных соединений, и на основе модели потенциала основного состояния получена полуэмпирическая формула для расчета химического сдвига.

В работе проведен анализ экспериментальных спектров от полубесконечного ниобия и пленок нитрида ниобия. На основе развитой модели разложения фотоэлектронных спектров и скорректированных данных была получена информация о химическом составе и толщинах пленок нитрида ниобия. Обнаружено, что сверху нитридной пленки находились оксидные слои ниобия Nb_2O_5 и NbO_2 , а небольшое количество $NbNO$ распределено по всей толщине пленки.

Литература

1. **Физические** основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: учебное пособие / В.И. Троян, М.А. Пушкин, В.Д. Борман, В.Н. Тронин; под ред. В.Д. Бормана. М.: МИФИ, 2008. 260 с.

*С.В. Никурашин, студ.; рук-ли С.Д. Федорович, к.т.н., доц.;
А.В. Елецкий, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (МЕТАЛЛОВ) УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ ИСТОЧНИКАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Актуальность исследования механизмов поверхностного упрочнения конструкционных материалов (металлов) обусловлена развитием современных технологий, испытывающих потребность в материалах с повышенными механическими характеристиками. Разработка, создание и массовое промышленное производство таких материалов будет, с одной стороны, способствовать развитию современных технологий. С другой стороны, повышение механических характеристик конструкционных материалов позволит повысить износостойкость и, соответственно, срок службы металлических конструкций, что, в свою очередь, даст возможность сохранить темпы роста оснащенности предприятий металлическими конструкциями без увеличения уровня добычи металлов.

Результаты исследований в области механических характеристик углеродных наноструктур опубликованы в обзорной статье [1]. Детальное исследование эффекта поверхностного упрочнения конструкционных материалов в результате нанесения углеродных наноструктур с последующей обработкой высокоинтенсивными источниками энергии является новизной проводимых исследований.

Автором получены экспериментальные данные по микротвердости и элементному составу выбранных для исследования образцов. Разработана методика нанесения упрочняющего слоя на поверхность образцов. Выполнены работы по прогреву образцов в вакууме. Выполнена оценка толщины покрытия (фуллереновая сажа) весовым методом. В настоящее время выполняются работы по выбору оптимальных режимов обработки образцов высокоинтенсивными источниками энергии.

Экспериментальные данные о характере изменения поверхности конструкционных материалов в результате нанесения нанокремниевых материалов с последующей обработкой с помощью высокоинтенсивных источников энергии будут использованы для создания физико-химической модели модификации поверхности.

Литература

1. **Елецкий А.В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 3. С. 233—274.

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ РАСПЫЛЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК «НА ПРОСТРЕЛ»

Физическое распыление, связанное с переносом импульса первичных частиц и выбитых из положения равновесия атомов мишени, приводит к разрушению конструкционных материалов, взаимодействующих с периферийной плазмой в крупных плазменных установках. Информация об энергетических распределениях выбитых из материала атомов позволит сделать вывод о ресурсе конструкционного материала и описать дальнейший перенос выбитых частиц в центральную область разряда. Таким образом, создание теории распыления легкими ионами является актуальной задачей.

Материалы, которые будут использоваться при создании термоядерного реактора, являются слоисто-неоднородными. Для описания распыления слоистой структуры необходимо определять не только функцию обратного распыления, но и функцию распыления слоя «на прострел»: частицы, выбитые из тонкого верхнего слоя материала идвигающиеся в нисходящем потоке способны распылить нижний слой материала, после чего распыленные частицы пройдут сквозь верхний слой и покинут материал. В данной работе функция прямого распыления находится из уравнения, полученного на основе принципа инвариантного погружения, которое решается в модели дискретных потоков. Результаты решения данного уравнения сравнивались с результатами компьютерного моделирования в программе SRIM2013pro. На рис. 1 показан результат расчета функции прямого распыления слоя бериллия ионами гелия с энергией 10 кэВ для различных толщин пленки. Как видно из графика, получено приемлемое согласие результатов расчетов с результатами моделирования.

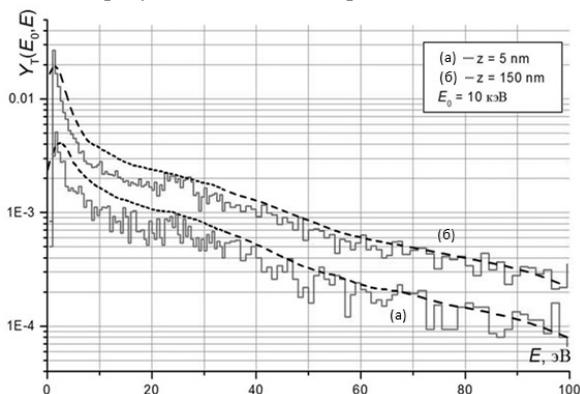


Рис. 1. Функция прямого распыления слоя бериллия ионами гелия

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Исследование взаимодействия изотопов водорода с различными конструкционными материалами сегодня является основной задачей водородной энергетики и управляемого термоядерного синтеза. Уникальные свойства углеводородных покрытий уже более 30 лет вызывают огромный интерес. Существует ряд методов, позволяющих детектировать изотопы водорода (метод ядерных реакций, метод эллипсометрии), однако также могут быть использованы методы электронной спектроскопии.

Получив информацию об элементном составе с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), эти данные можно существенно уточнить, добавив в них информацию о присутствии изотопов водорода, восстановленных по методу спектроскопии пиков упруго отраженных электронов. Проблема при расшифровке спектров заключается в правильном выделении полезного сигнала пика водорода относительно «фона» плазменных потерь энергии электронов. Методом РФЭС обнаружение водорода невозможно. Поэтому восстановим сечение неупругого рассеяния электронов в углеводороде из этого спектра с помощью процедуры подбора. При сравнении (рис. 1) экспериментального спектра характеристических потерь энергии электронами (ХПЭ) [1] со спектром, рассчитанным с использованием полученного сечения, удастся правильно выделить сигнал от водорода, что позволяет определить стехиометрию углеводородного соединения в мишени.

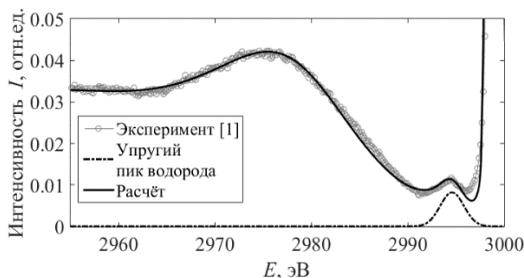


Рис. 1. Спектр ХПЭ углеводорода, $E_0 = 3000$ эВ

Литература

1. *Kostanovskiy I.A., Afanas'ev V.P., Naujoks D., Mayer M.* // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. 2015. Vol. 202. P. 22—25.

СУБОКСИДНЫЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ НИОБИЯ

В последнее время все больше внимания уделяется изучению оксидных и субоксидных пленок переходных металлов [1]. На их основе возможно создание таких устройств, как диоды Шоттки, которые обеспечивают значительные преимущества перед традиционными диодами на основе кремния и его соединений, резистивная память с произвольным доступом (Resistive random access memory — ReRAM), а также различные виды детекторов и датчиков. Один из методов исследования таких пленок — это метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [1, 2].

Структура оксидных пленок исследовалась в работе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с помощью модуля электронно-ионной спектроскопии на базе платформы Нанофаб 25 (НТ-МДТ). Для анализа оксидных пленок ниобия была выбрана линия Nb 3d. Эта линия может состоять из дуплета неокисленного ниобия и различных дуплетов окисленного металла. Так как максимальная степень окисления ниобия равна 5, то линия Nb 3d в спектре может состоять из 12 отдельных пиков. Существующие стандартные методы обработки РФЭС не позволяют выполнять анализ таких линий. В данной работе предложена модель, учитывающая особенности фотоэлектронного спектра и позволяющая раскладывать сложные линии на составляющие. Модель включает в себя: дуплетную структуру пиков, спутниковые пики, зависимость химического сдвига от ковалентного радиуса. Для расчета толщин окисленных слоев было принято, что вначале мишень полубесконечная, металлическая и однородная. При окислении металла степень окисления будет уменьшаться по глубине, так как процесс окисления идет только со стороны верхней границы мишени [2]. Тогда можно выделить однородные слои, в которых степень окисления металла одинаковая. Количество слоев над металлической подложкой будет равно максимальной степени окисления.

На основе разработанной модели были получены химический состав и толщины субоксидных слоев ниобия.

Литература

1. **Nano** suboxide layer generated in Ta₂O₅ by Ar⁺ ion irradiation / W.D. Song, J.F. Ying, W. He et al. 2015.
2. **Grundner M., Halbritter J.** XPS and AES studies on oxide growth and oxide coatings on niobium, 1980.

И.В. Шуркаева, асп.; рук-ли А.В. Лубенченко, д.т.н., проф.;
А.А. Батраков, к.ф.-м.н, доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА НИОБИЯ ИОНАМИ АРГОНА

В последнее время увеличивается применение и производство ниобия. Это связано с уникальными свойствами данного металла: тугоплавкость, коррозионная стойкостью, способностью образовывать сверхпроводящие соединения. Например, на основе пленок нитрида ниобия созданы однофотонные детекторы с высоким временным разрешением [1].

В работе [2] исследовались пленки нитрида ниобия на кремниевой подложке, полученные методом магнетронного напыления. Подложка имела комнатную температуру. В настоящей работе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) было проведено исследование пленок нитрида ниобия, напыленных на кремниевую подложку, которая была нагрета до 200 °С. Спектры были сняты с помощью модуля электронно-ионной спектроскопии на базе платформы Нанофаб 25. Послойное травление выполнялось с помощью пучка ионов Ar^+ с разверткой 4.0×4.0 мм и энергией 1 кэВ, падающих под углом 55° к нормали поверхности образца, ток пучка составлял при этом 1 мкА. Длительность одного цикла распыления составляла 20 минут. После каждого цикла распыления снимались фотоэлектронные спектры.

Химический анализа пленки нитрида ниобия был проведен с помощью программы AnalysisLineXPS, созданной на кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ». В пленке обнаружены соединения Nb_2O_5 , NbO_2 , $NbNO$, NbN . После анализа всех циклов распыления были получены следующие результаты: 1) сверху нитридной пленки находился оксидный слой ниобия из Nb_2O_5 и NbO_2 ; 2) происходит преимущественное распыление азота; 3) степень окисления ниобия уменьшается и изменяется фазовое состояние нитрида ниобия.

Литература

1. **Манова Н.Н., Корнеева Ю.П., Корнеев А.А. и др.** Сверхпроводниковый NbN однофотонный детектор, интегрированный с четвертьволновым резонатором // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 10. С. 49—55.

2. **Лубенченко А.В., Батраков А.А., Паволоцкий А.Б. и др.** // Труды 22-й Международной конференции ВИП-2015. М., 2015. Т. 1. С. 124—126.

Секция 40

ТЕПЛОФИЗИКА

Председатель секции — д.ф.-м.н., профессор О.А. Синкевич

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

*О.И. Афанасьева, асп.; П.Ю. Плотов, студ.; М.Г. Зеодинов, к.т.н.;
рук. А.В. Костановский, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Одним из способов повышения эффективности конвективного теплообмена является применение наножидкости в качестве теплоносителя [1].

Экспериментально исследован коэффициент теплоотдачи наножидкости при течении в горизонтальном канале. Наножидкость была приготовлена на основе дистиллированной воды и наночастиц оксида алюминия (50 нм) для различных объемных концентраций — от 0,25 до 2 %. Для приготовления наножидкости был использован двухступенчатый метод. После добавления в базовую жидкость необходимого количества нанопорошка оксида алюминия емкость с наножидкостью помещалась в ультразвуковую ванну для разрушения конгломератов.

Установка представляет собой замкнутый контур с циркулирующим теплоносителем. Обогреваемый участок представляет собой цилиндрический канал из нержавеющей стали с длиной $l = 70$ мм, $d = 5$ мм и толщиной стенки 0,5 мм. Нагрев канала осуществлялся пропусканием электрического тока, мощность регулировалась трансформатором ЛАТР. Для измерения температуры наножидкости заложено 13 термопар на равном расстоянии друг от друга, а также две термопары на входе и выходе из канала. Измерение температуры осуществляется с помощью мультиметра АРРА 303. Расход теплоносителя измерялся с помощью ротаметра. Расход изменялся от 0,0062 до 0,0160 кг/с. Вязкость наножидкости измерялась ротационным вискозиметром.

Результаты измерений показали увеличение коэффициент теплоотдачи наножидкости на 15—20 % в зависимости от концентрации по сравнению с базовой жидкостью. Также при измерении вязкости было обнаружено, что наножидкость с концентрацией менее 1 % можно считать ньютоновской. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем согласовании с данными, имеющимися в литературе [2].

Литература

1. **Heat** transfer enhancement using nano fluids and Innovative methods / Т. Kavitha, А. Rajendran, А. Durairajan, А. Shanmugam // IJMET. 2012. 3. P. 769—782.

2. **Расчетно-экспериментальное** исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе оксида алюминия в прямоточном теплообменнике / А.В. Минаков, Д.В. Гузей, А.С. Лобасов и др. // J. Siberian Federal University. Engineering & Technologies 1. 2014. Вып. 7. С. 32—47.

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

В работе методом прямого численного моделирования (DNS) исследуется МГД-теплообмен при течении жидкого металла в круглой трубе. В силу ряда особенностей жидкие металлы рассматриваются как перспективные теплоносители для атомной и термоядерной энергетики. Широкое применение жидкие металлы могут найти, например, в blankets и divertors термоядерных реакторов типа токамак. Гидродинамика и теплообмен в токамаках будут происходить в условиях сильных магнитных полей при воздействии высоких тепловых нагрузок [1]. Наряду с экспериментальными исследованиями этих процессов может быть использовано численное моделирование. Преимущество применения DNS состоит в том, что данные, которые были получены при реализации различных моделей турбулентности [2], могут быть сопоставлены с результатами DNS и на основании такого сравнения сделан вывод о пригодности моделей.

В данной работе проводилось моделирование теплообмена в круглой трубе при турбулентном режиме течения со следующими параметрами: число Прандтля $Pr = 2.72 \cdot 10^{-2}$ и диапазон чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 — 16 \cdot 10^3$. В ходе работы были рассмотрены гидродинамическая и тепловая тестовые задачи. Рассчитаны мгновенные поля скорости и температуры, поля осредненной скорости и температуры, статистические характеристики турбулентного течения, а также коэффициент сопротивления и число Нуссельта.

Тестовые расчеты показали хорошее согласие результатов с известными теоретическими и опытными данными [3]. Дальнейшие исследования будут связаны с расчетом МГД-теплообмена в условиях воздействия магнитного поля на течение.

Литература

1. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2001.
2. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Введение в статистическую теорию турбулентности. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. **Теплообмен** в ядерных энергетических установках / В.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалёв, С.Л. Соловьёв. М.: Издательство МЭИ, 2003.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Исследование температурных полей многослойных конструкций с несимметричными граничными условиями, кусочно-однородными теплофизическими свойствами, переменными начальными условиями с использованием точных аналитических методов крайне затруднительно, а во многих случаях не представляется возможным. Кроме того, получение аналитических решений подобных задач существенно усложняется необходимостью выполнения условий сопряжения между слоями, задаваемых в виде равенства температур и тепловых потоков в точках контактов слоев.

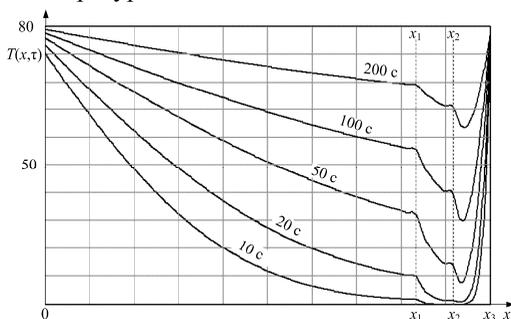


Рис. 1. Распределение температуры в многослойной пластине

В настоящей работе на основе метода конечных разностей разработан алгоритм получения численных решений задач теплопроводности для многослойных пластин при несимметричных граничных условиях третьего рода. Особенности реализации данного алгоритма в среде Maple рассмотрены на примере решения задачи теплопроводности для трехслойной пластины при следующих исходных данных:

$$x_1 = 10 \text{ мм}; x_2 = 11 \text{ мм}; x_3 = 12 \text{ мм}; \lambda_1 = 150 \text{ Вт/(м·К)}; \lambda_2 = 50 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$a_1 = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; a_2 = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; a_3 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; T_{cp1} = T_{cp2} = 80 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\alpha_1 = 15 \text{ Вт/(м·К)}; \alpha_2 = 150 \text{ Вт/(м·К)}; T_1 = T_2 = T_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

На рис. 1 представлены результаты численного расчета температуры.

Литература

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач теплопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высшая школа, 2005.

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

ПЛЕНОЧНОЕ КИПЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НЕДОГРЕВОВ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ

Как известно, существуют три типа кипения: пузырьковый, переходный и пленочный. Отличительная особенность пленочного кипения — отсутствие контакта жидкости с горячей поверхностью. При этом, ввиду низкой теплопроводности пара, темп охлаждения не высок. Однако, как впервые показано английскими исследователями и позднее в работах МЭИ [1], при недогревах воды до температуры насыщения более 30 °С, охлаждение высокотемпературных тел характеризуется высокими коэффициентами теплоотдачи, совершенно нетипичными для пленочного режима. Многие специалисты по закалке считают, что при этом начинается пузырьковое кипение, однако это явно противоречит законам термодинамики.

Наличие такого необычного режима, наблюдаемого на воде, стимулировал проведение комплекса исследований по изучению пленочного кипения на других жидкостях. Для этих целей на кафедре ИТФ создана экспериментальная установка, позволяющая изучать процессы охлаждения высокотемпературных поверхностей в жидкостях при низких температурах, т.е. при больших недогревах. Рабочими участками служили шар из нержавеющей стали диаметром 38 мм и медный шар диаметром 45 мм. В качестве исследуемых жидкостей использовались изопропанол и перфторгексан. Максимальный уровень недогрева составлял 160 °С.

Основным результатом исследований является экспериментальное подтверждение отсутствия режима интенсивного охлаждения на этих жидкостях даже в условиях огромных недогревов до температуры насыщения. Экспериментальные данные показали хорошее согласие с формулой Ягова — Лексина для пленочного кипения недогретых жидкостей.

Литература

1. **Yagov V.V., Zabirov A.R., Lexin M.A.** Unsteady heat transfer during subcooled film boiling // *Thermal Engineering* 62 (2015). No.11. P. 833—842.

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

УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КОНВЕКЦИИ В СЛОЕ МОРСКОЙ ВОДЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Исследуется задача о возникновении конвекции в плоском слое вязкой теплопроводной морской воды при падении на слой электромагнитной волны. В данной работе, которая продолжает работу [1], проведено исследование устойчивости стационарных режимов нагрева жидкости. Анализ конвекции проводится в приближении Буссинеска с учетом возмущения джоулева тепловыделения. Установлено, что стационарные режимы неравномерного нагрева жидкости могут быть неустойчивыми и приводить к возникновению конвекции. Проведен анализ совместного влияния на возникновение конвекции термического расширения и джоулева тепловыделения и показано, что даже при незначительном влиянии тепловой конвекции возмущения джоулева нагрева могут приводить к развитию конвекции. В пространстве рабочих параметров (число Рэлея, длина волны возмущения, число Нуссельта, интенсивность джоулева нагрева и частота электромагнитной волны) установлены границы возникновения тепловой конвекции в плоском слое морской воды при нагреве воды электромагнитной волной. Получены кривые нейтральной устойчивости, отделяющие области устойчивости и области, где развивается тепловая конвекция, как нейтральные кривые для монотонных и для немонотонных профилей температуры. Эти данные могут представлять интерес для различных технологий, использующих нагрев морской воды посредством микроволнового излучения.

В приближении Буссинеска рассмотрен вопрос об устойчивости малых двумерных возмущений стационарных распределений температуры в слое. Получены нейтральные кривые, отделяющие области устойчивости от области неустойчивости, — зависимости числа Рэлея от волнового числа.

Исследовано влияние разности между температурой окружающей среды и температурой нижней стенки слоя на возникновение конвекции.

Литература

1. Синкевич О.А., Зубков Е.И., Коршунов Ю.С. Конвекция в слое воды, вызванная электромагнитной волной. I. Стационарные режимы нагрева // Инженерная физика. 2014. № 10. С. 22—30.

Н.О. Зубов, асп.; А.Д. Пуцын, студ.;
рук. О.Н. Кабаньков, доц., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ НА ВЫХОДЕ ИЗ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТРУБЫ КОНТУРА ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ВИДЕОСЪЕМКИ

Представлены результаты видеосъемки выходной струи теплоносителя на срезе подъемной секции контура естественной циркуляции. Рабочий участок — труба из нержавеющей стали внутренним диаметром $d = 9,1$ мм — состоял из обогреваемой секции длиной 92 калибра и верхнего тягового участка длиной 54 калибра. Эксперименты выполнены в диапазоне тепловых потоков $6,0—74$ кВт/м², при температурах жидкости на входе в зону обогрева $300—373$ К. Видеосъемка формы струи на выходе из подъемного участка выполнена при различных режимах циркуляции вдоль зоны обогрева: при однофазном течении, в смешанных режимах циркуляции, когда в канале существуют однофазное и двухфазное течение, и в двухфазных режимах течения, когда практически по всей длине трубы реализуется режим кипения. На основе анализа кадровой развертки видеосъемки проведена оценка периодичности следования характерных структур двухфазного потока в зависимости от плотности теплового потока и недогрева жидкости до температуры насыщения на входе в обогреваемую трубу. При смешанных режимах циркуляции наблюдалась неустойчивость течения, приводившая к периодическим выбросам жидкости из трубы и низкочастотным колебаниям расхода и температуры стенки трубы, амплитуда которых в ряде случаев достигала значительных величин. Периодичность выбросов жидкости из трубы коррелирует с периодами колебаний температуры стенки канала и расхода в контуре. Характерные кадры видеосъемки, соответствующие различным моментам времени при $q = 25,8$ кВт/м² и $T_{вх} = 27$ °С, показаны на рис. 1.



Рис. 1. Покадровая развертка видеосъемки структуры потока на выходе из трубы при $q = 25,8$ кВт/м² и $T_{вх} = 27$ °С

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-08-05106.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КИПЯЩЕГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КОНТУРЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

В последнее время возрос интерес к применению контуров естественной циркуляции (КЕЦ) низкого давления в различных практических приложениях (солнечные коллекторы возобновляемой энергетики, системы пассивной послеаварийной защиты ЯР АЭС и др.).

Известно, что при низких давлениях течение двухфазного теплоносителя в контуре характеризуется низкой гидродинамической устойчивостью, при этом опытные данные ограничены, отсутствуют надежные методы определения границ устойчивости двухфазного течения.

В работе рассмотрены различные типы неустойчивости потока, характерные для двухфазных систем. Проведено экспериментальное исследование различных режимов циркуляции в контуре: однофазной конвекции, смешанных режимов, когда в канале существуют однофазное и двухфазное течение, и режимов, когда практически по всей длине трубы реализуется режим кипения.

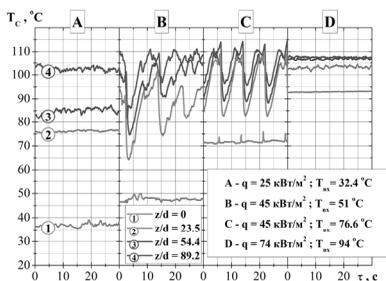


Рис. 1. Оциллограммы температуры стенки

рис. 1, А показаны изменения температуры при однофазном течении. В смешанных режимах наблюдается сильная неустойчивость течения (рис. 1, В, С). При кипении по всей длине зоны обогрева колебания расхода и температуры стенки трубы становятся незначительными (рис. 1, D) наступает устойчивый режим течения. Наблюдаемый тип неустойчивости обусловлен закипанием жидкости, т.е. сменой режима течения, переходом от однофазной конвекции к двухфазному потоку.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-08-05106.

Исследования проводились в циркуляционном контуре с вертикальным обогреваемым каналом в диапазоне тепловых потоков от 6,0 до 70 кВт/м², при давлении 100 кПа и изменении температуры жидкости на входе от 300 до 373 К. Типичные оциллограммы температуры стенки, измеренные в разных сечениях по высоте трубы при разных значениях подводимого теплового потока, показаны на рис. 1. На

МГД-ТЕПЛООБМЕН РАСПЛАВОВ СОЛЕЙ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В данной работе предложен первый вариант математической модели для анализа турбулентного течения и теплообмена жидкостей с числами Прандтля $Pr > 1$ в поперечном магнитном поле. Рассмотрены режимы, характеризующиеся числами $Ha = 0...40$ и $Re = 5000...20000$, соответствующие рабочим режимам в термоядерных источниках нейтронов с расплавленными солями как теплоносителями. Реализован алгоритм численного решения системы уравнений сохранения с учетом влияния магнитного поля на турбулентный перенос импульса и тепла. Представлены результаты тестирования реализованного алгоритма на экспериментальных данных о теплоотдаче и профилях осредненной температуры в турбулентном потоке воды в круглой трубе в отсутствие магнитного поля. Проведены параметрические расчеты влияния на течение и теплообмен поперечного магнитного поля в круглой трубе. Результаты сопоставлены с экспериментальными данными по теплоотдаче 30 %-го раствора КОН как модельной жидкости (рис. 1). Как видно по графику, уровень теплоотдачи в расчете и в эксперименте количественно снижается на одну и ту же величину, однако качественное изменение теплоотдачи под действием магнитного поля происходит по-другому. Это может быть связано с тем, что в наших расчетах мы считаем, что подавление турбулентности происходит практически мгновенно после наложения магнитного поля.

В ряде случаев для расплавов солей влияние магнитного поля значительно и может приводить также к полному подавлению турбулентности.

Литература

1. Генин Л.Г., Краснощёкова Т.Е., Свиридов Е.В. Гидродинамика и теплообмен при течении электропроводной жидкости в плоском канале в поперечном магнитном поле // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3.
2. The influence of a magnetic field on turbulent heat transfer of a high Prandtl number fluid / H. Nakaharai, J. Takeuchi, T. Yokomine et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. 32.
3. Генин Л.Г., Свиридов В.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.

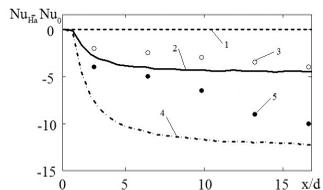


Рис. 1. Влияние магнитного поля на теплоотдачу по длине: Результаты расчета: 1 — $Ha = 0$; 2 — $Ha = 10$; 4 — $Ha = 15$. Результаты опытов: 3 — $Ha = 10$; 5 — $Ha = 15$

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

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА (ОЦР), ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ И МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА НИЗКОПЕНЦИАЛЬНОМ ТЕПЛЕ

Тенденция развития современного автомобилестроения заключается в повышении КПД работы двигателя. В данном направлении в настоящее время прикладываются интенсивные научные и конструкторские усилия [1]. Энергетическая установка на ОЦР позволит запитывать навесное оборудование двигателя, используя тепло отработавших газов, что приведет к экономии топлива на 15—25 % в зависимости от климатического региона.

Энергетическая установка ОЦР, использующая низкопотенциальное тепло, позволит использовать для генерации электроэнергии также и тепло, накапливаемое в бытовых гелиотермальных системах, использующих вакуумные коллекторы. Это позволит создать дешевую и надежную альтернативу аналогичным системам на солнечных элементах.

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

В настоящее время работы ведутся на первом этапе проекта и включают в себя: разработку принципиальной схемы контура; выбор рабочего тела и определение основных рабочих параметров АЭУ-ОЦР; численное моделирование работы АЭУ-ОЦР.

Литература

1. **Freyman, R., Strobl, W., & Obieglo, A.** The Turbosteamer: A System Introducing the Principle of Cogeneration in Automotive Applications // *Motortechnische Zeitschrift*. 2008. 69. № 5. P. 20—27.

*А.Ю. Михайлов, студ.; Д.А. Огнерубов, асп.;
рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГИДРОДИНАМИКУ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

В данной работе исследуется влияние неоднородного поперечного магнитного поля на гидродинамику потока жидкого металла (ртути) в круглой трубе.

Исследование проводилось методом прямого численного моделирования (DNS). Моделировался изотермический поток ртути со следующими параметрами: $Re = 10000$, $Pr = 0.025$, $Ha = 0—1000$. Расчет проводился в трехмерной постановке задачи.

В ходе анализа современной литературы были найдены работы, в которых изложены некоторые особенности, связанные с воздействием неоднородного магнитного поля на гидродинамику потока, а именно эффект подавления турбулентности, распределение коэффициента гидравлического сопротивления по длине трубы, распределение полей скорости и токов. Но, несмотря на значительное количество работ, в данной области все еще есть неисследованные эффекты и явления, которые будут представлены в рамках доклада.

Данная работа рассматривается как первый этап к исследованию воздействия неоднородного поперечного магнитного поля большой интенсивности на гидродинамику и теплообмен потока жидкого металла. Такая конфигурация наблюдается в системах охлаждения бланкетов термоядерных реакторов и интересна как с точки зрения теплообмена, так и с точки зрения расчета элементов конструкции на прочность.

В результате серии численных экспериментов были получены распределения статистически осредненных параметров, таких как скорость, давление, ток, электромагнитная сила и потенциал по объему трубы. Наряду с этим были получены распределения интенсивности пульсаций скорости, давления, электромагнитной силы, а также распределение коэффициента гидравлического сопротивления по длине трубы.

В работе подробно описаны эффекты, которые получены в результате воздействия неоднородного магнитного поля на поток жидкого металла в зонах входа/выхода из-под воздействия магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ И ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В МОДЕЛЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА БРЕСТ

Основой проектирования вновь создаваемых атомных и термоядерных реакторов является теплогидравлический расчет активной зоны. Для выполнения такого расчета в настоящее время используется современная компьютерная техника и различные расчетные коды [1, 2]. Кафедра инженерной теплофизики в недавнее время провела ряд экспериментов, связанных с верификацией машинных кодов для реактора БРЕСТ.

Было решено создать испытательную конструкцию, моделирующую условия теплообмена в активной зоне реактора, и провести экспериментальный и численный расчет полей температур.

Целью данной работы является проектирование экспериментальной установки и проведение эксперимента. У большинства жидких металлов высокая температура плавления, вследствие чего более экономично проводить эксперимент на ртути, так как она находится в жидком состоянии при комнатных температурах.

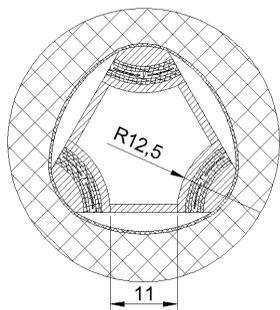


Рис. 1. Разрез поперечного сечения опытного участка

Канал образован тремя одинаковыми частями трубы, имитирующими твэлы, каждая из которых представляет собой шестую часть целой трубы. Между ними находятся плоские перегородки, соединенные с трубами лазерной сваркой. Предусмотрена возможность введения в канал элемента дистанцирующей решетки, способного передвигаться в вертикальном направлении канала для обеспечения возможности исследования изменений температурного поля в исследуемом сечении в зависимости от удаленности от решетки. Длина опытного участка составляет 1 м. Поперечное сечение опытного участка представлено на рис. 1.

Литература

1. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалёв, С.Л. Соловьёв. М.: Издательство МЭИ, 2003. 548 с.
2. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет ядерных реакторов. Часть 1. Общие вопросы. Обнинск, 2001.

Г.А. Панфилов, студ.; рук. А.В. Ерёмин, к.т.н. (СамГТУ, г. Самара)

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

При исследовании температуры жидкостей, движущихся с большими скоростями, необходимо учитывать теплоту трения [1, 2]. Решение этой проблемы имеет особую актуальность при анализе температурного состояния пограничных слоев, где даже при турбулентном течении сохраняется тонкий вязкий подслой, имеющий большие градиенты скорости, обуславливающие возникновение теплоты трения.

В работе выполнено исследование температурного поля в жидкости, движущейся в цилиндрическом канале. Математическая постановка данной задачи в безразмерном виде имеет вид

$$\xi(1-\xi^2) \frac{\partial \Theta(\xi, \eta)}{\partial \eta} - \frac{\partial \Theta(\xi, \eta)}{\partial \xi} - \xi \frac{\partial^2 \Theta(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} - B\xi^3 = 0 ;$$

$$\Theta(\xi, 0) = 0 ; \quad \frac{\partial \Theta(0, \eta)}{\partial \xi} = 0 ; \quad \Theta(1, \eta) = A ,$$

где $A = \Delta T \lambda / (\mu w_s^2) = \text{const}$; $\Delta T = T_w - T_0$; $B = 16$.

При получении решения использован метод конечных разностей. Аппроксимация дифференциальных операторов осуществлялась согласно явной схеме. Результаты расчетов при $A = 1$ представлены на рис. 1.

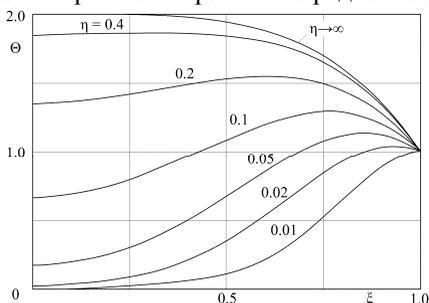


Рис. 1. Распределение температуры в цилиндрическом канале

Анализ результатов расчетов позволил определить влияние диссипации энергии на распределение температуры в канале, определить температуру в центре канала в зависимости от значения продольной координаты.

Литература

1. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

Н.М. Портнова, студ.; рук. Ю.Б. Смирнов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ

В связи с созданием новых типов систем пассивной безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в последнее время во многих странах проводятся расчетные и экспериментальные исследования процесса конденсации водяного пара из многокомпонентных парогазовых смесей в элементах этих систем [1—3].

В настоящей работе предложена методика расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации многокомпонентной парогазовой смеси, основанная на пленочной модели процесса конденсации и аналогии между процессами тепло- и массообмена. Расчетные данные по теплоотдаче получены для условий, реализованных в работе Su [1] (конденсация смесей водяной пар—воздух и водяной пар—воздух—гелий при давлениях от 2 до 6 бар, ламинарно-волновое течение пленки конденсата, турбулентная свободная конвекция в диффузионном слое). Методика также применялась для расчета теплоотдачи при конденсации смеси водяной пар—азот в условиях опытов, проведенных в работе Kim [3] (давления до 20 бар, широкий диапазон изменения концентрации азота в смеси). Результаты наших расчетов хорошо согласуются с опытными данными [1] и [3]. Расчет также показал, что замена в лабораторных экспериментах по конденсации парогазовых смесей водорода гелием вполне допустима, так как при этом коэффициент теплоотдачи изменяется незначительно.

Формулы Tagami и Uhida, широко используемые в настоящее время для расчетов процессов конденсации водяного пара из смеси с воздухом в контейменте ЯЭУ [2], предсказывают значительно более низкие значения коэффициентов теплоотдачи по сравнению с надежными опытными данными и результатами наших расчетов

Литература

1. **Experimental** study of the effect of noncondensable gases on steam condensation over a vertical tube external surface / J. Su, Z. Sun, G. Fan, M. Ding // Nucl. Eng. Des. 2013. P. 201—208.
2. **Computational** fluid dynamics modeling of steam condensation on nuclear containment wall surfaces based on semi-empirical generalized correlations / P.K. Sharma, B. Gera, R.K. Singh, and K.K. Vaze // Science and Technology of Nuclear Installations. 2012, Article ID 106759.
3. **Condensation** heat transfer characteristics in the presence of noncondensable gas on natural convection at high pressure / J.W. Kim, Y.G. Lee, H.K. Ahn, G.C. Park // Nucl. Eng. Des. 2009. P. 688—698.

ПОДЪЕМНОЕ И ОПУСКНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ В КОМПЛАНАРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В современных перспективных ядерных и термоядерных установках реализуются МГД-течения различной конфигурации. Одна их таких конфигураций — течение теплоносителя в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле. Экспериментальные данные, представленные в этой работе, были получены на объединенном ртутном МГД-стенде МЭИ — ОИВТ РАН. Рассматривается опускное течение ЖМ в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле (МП). Эксперименты проводились при двустороннем режиме обогрева со следующими режимными параметрами: $Re = 10\,000 \div 50\,000$, $Ha = 0 \div 800$, $q_c = 5000 \div 35\,000$ Вт/м² или $Gr_q = 1,2 \cdot 10^8 \div 7 \cdot 10^8$.

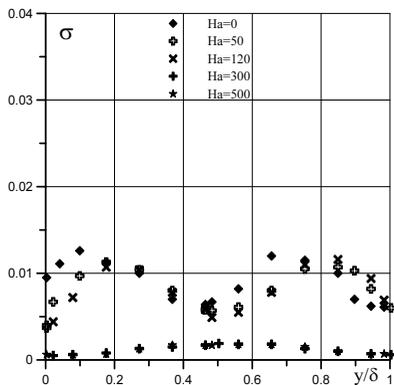


Рис. 1. Интенсивность пульсаций температуры в поперечном сечении канала. $Re = 20000$; $Gr_q = 1,2 \cdot 10^8$

При имеющейся конфигурации течения влияние на поток ЖМ оказывают два фактора: термогравитационная конвекция (ТГК) и МП. В условиях эксперимента роль ТГК существенна и проявляется в том, что профиль температуры уплощается и становится более заполненным. МП, напротив, делает профиль температуры более вытянутым. На практике важно разделить влияние этих двух факторов [1]. В ходе работы были получены экспериментальные данные, которые позволяют отразить влияние компланарного МП на течение ЖМ. Пример экспериментальных данных представлен на рис. 1.

Для создания модели, которая учитывала бы оба фактора (ТГК и МП) как вместе, так и отдельно, проводится серия экспериментов по исследованию подъемного течения ЖМ в прямоугольном канале в компланарном МП.

Литература

1. Генин Л.Г., Краснощекова Т.Е., Свиридов Е.В. Гидродинамика и теплообмен при течении электропроводной жидкости в плоском канале в поперечном магнитном поле // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 3. С. 461—469.

М.В. Свешников, асп.; рук. О.А. Синкевич, д.ф.-м.н. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В КОНТУРЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ С ПОДВОДОМ И ОТВОДОМ ТЕПЛОТЫ

В тепловых циклах типа прямого цикла Карно для получения положительной работы за цикл необходимо, чтобы работа расширения превышала работу сжатия. Для нормальных веществ это достигается за счет того, что давление в области расширения среды должно быть больше давления в области сжатия среды. В технике это получается за счет внешних механических воздействий: поршней, насосов. В природе при свободной конвекции: за счет действия гравитации. Кроме гравитации еще одним внешним фактором, который смог бы создать и поддерживать необходимую разность давления, является движение среды в канале переменного сечения. Для проверки теории такого рода течений в [1] была решена численно одномерная задача о течении в контуре, заполненном гелием. Были найдены условия существования стационарного течения.

В настоящей работе в рамках уравнений Навье—Стокса проводился поиск условий существования двумерного стационарного турбулентного периодического течения в контуре переменного сечения с подводом и отводом теплоты. В результате расчетов, выполненных в программной среде Ansys Fluent 14.5, методом установления найдены профили статического давления, температуры и скорости на входе и выходе осесимметричного канала переменного сечения при подводимом и отводимом тепловых потоках.

Результаты, полученные при решении двумерной задачи в настоящей работе, являются подтверждением результатов решения одномерной задачи, а также доказывают возможность создания стационарного течения в замкнутом контуре переменного сечения при подводе и отводе тепла к стенкам канала. Рассматривается возможность создания на этом принципе МГД-генератора замкнутого цикла для космических приложений. Рабочей средой такого генератора может являться инертный газ (в первую очередь гелий) с добавками щелочного металла (цезий).

Литература

1. Глазков В.В., Синкевич О.А. Самоподдерживающиеся термоконвективные течения в отсутствие внешних силовых полей // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 2. С. 11—17.

Н.А. Тялина, студ.; рук. Я.И. Листратов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОДЫ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

В данной работе исследуется гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении воды в круглой трубе с помощью метода прямого численного моделирования.

Вода является одним из самых распространенных теплоносителей и часто служит модельной жидкостью. В энергетических ядерных реакторах на тепловых нейтронах она используется для охлаждения активной зоны. В будущих термоядерных реакторах возможно применение воды в качестве теплоносителя в blankets. В частности, водяная система охлаждения принята в качестве основной в Международном экспериментальном термоядерном реакторе (ITER). Кроме того, вода может быть использована как модельная жидкость при исследовании гидродинамики и теплообмена в задачах с течением расплавов солей, которые рассматриваются как возможные теплоносители для термоядерных энергетических реакторов или термоядерных источников нейтронов.

В работе использовался метод прямого численного моделирования (DNS) [1], который позволяет моделировать турбулентные течения, не используя какие-либо модели турбулентности, что является существенным преимуществом.

Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена при турбулентном течении в трубе проводилось при числе Прандтля $Pr = 7$ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^3 — 15 \cdot 10^3$. Были рассчитаны поля мгновенной и осредненной скорости и температуры, интенсивности пульсаций скорости и температуры, коэффициент сопротивления и число Нуссельта.

Проведен анализ полученных результатов, на основании которого сделан вывод: данные, полученные с помощью прямого численного моделирования, неплохо совпадают с известными теоретическими зависимостями [2, 3]. В дальнейшем планируется исследовать воздействие термогравитационной конвекции на гидродинамику и теплообмен в рассматриваемых условиях.

Литература

1. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективно-го теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Введение в статистическую теорию турбулентности. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. **Ягов В.В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

*Н.В. Шапель, студ.; рук. Е.В. Свиридов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
конс. Д.А. Бирюков, к.т.н. (ОИВТ РАН)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В настоящее время в ядерной энергетике реакторам на быстрых нейтронах и термоядерным реакторам уделяется все большее внимание. Жидкие металлы являются перспективным теплоносителем в таких реакторах в первую очередь из-за высокой теплопроводности, а также в силу других специфических свойств.

Для моделирования процессов теплообмена в испытательных модулях blankets TOKAMAK проводились эксперименты [1], численные исследования [2] и было выявлено несколько особенностей, в частности неоднородное распределение локальных характеристик теплоотдачи по диаметру канала и наличие высоких температурных пульсаций.

Но достижимых на имеющихся экспериментальных стендах режимных параметров недостаточно для получения доскональной информации о процессах, происходящих в ТЯР. С целью расширения экспериментальной базы создается новая экспериментальная установка HELMEF с более высокими режимными параметрами [3]. Для проработки технологических решений (насосы, расходомеры, вентили, зонды) сконструирован малый контур с InGaSn-наполнением. Подобный подход применен в [4].

В работе представлены результаты исследований, проведенных на малом контуре.

Литература

1. **Belyaev I.A., Genin L.G., Listratov Ya.I. et al.** // *Magnetohydrodynamics*. 2013. Vol. 49. No. 1—2. P. 177.
2. **Listratov Ya.I., Ognerubov D., Sviridov V.G. et al.** // *Magnetohydrodynamics*. 2013. Vol. 49. No. 1—2/ P. 87.
3. **Batenin V.M., Belyaev I.A., Sviridov V.G. et al.** // *High Temperature*. 2015. Vol. 53. No 6. P. 897—900.
4. **Dubovikova N., Kolesnikov Yu. and Karcher Ch.** *Measurement Science & Technology, Experimental study of an electromagnetic flow meter for liquid metals based on torque measurement during pumping process (in press).*

Секция 41

ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

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

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

А.А. Белова, студ.; рук-ли А.П. Крюков, д.т.н., проф.;
И.Н. Шишкова, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ВЫЛЕТА АТОМА АРГОНА С ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФАЗ ПРИ ИСПАРЕНИИ

Ставится задача определения критической скорости движения молекул конденсированной фазы, при которой происходит их вылет в пар. При учете взаимодействия одного атома аргона с 22 соседними неподвижными атомами потенциальная энергия атома (рассчитанная по приведенным в [1] данным) составит 189,8 Дж/кг. Расчеты подтверждают, что вклад соседних частиц в потенциальную энергию взаимодействия тем меньше, чем дальше эти частицы находятся от рассматриваемого атома. Поэтому взаимодействием с остальными атомами можно пренебречь.

Для того чтобы молекула могла покинуть жидкость при испарении, ее энергия должна превышать потенциальную энергию взаимодействия. При вылете молекулы из жидкости ее энергия равна удельной теплоте парообразования (на одну молекулу). Сравнивая друг с другом эти величины, приходим к выводу, что их значения лишь приблизительно равны, поскольку при расчете взаимодействия частиц было сделано грубое допущение о том, что молекулы покоятся.

Жидкость покидают только те частицы, скорость которых превышает некоторую критическую. Количество частиц, вылетевших из жидкости, равно количеству частиц, перешедших в пар. Поэтому взаимосвязь плотностей жидкости и пара имеет вид

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{ж}} e^{-\frac{v_{\text{кр}}^2}{2RT}}$$

Из этого соотношения находится критическая скорость, при которой молекула покидает жидкость. По опытным данным, взятым из [2], при температуре 110,98 К критическая скорость атома аргона равна 406,4 м/с.

С другой стороны, критическая скорость — это скорость, при превышении которой кинетическая энергия молекулы становится больше ее потенциальной энергии. Из закона сохранения энергии, учитывая потенциал взаимодействия с 22 соседними молекулами и кинетическую энергию, полученную от ближайших молекул, найдем, что при температуре 110,98 К критическая скорость должна быть равна 384,1 м/с, что неплохо согласуется с оценкой, полученной из опытных данных.

Литература

1. **Гиршфельдер Дж., Кергисс Ч., Берд Р.** Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961.
2. **Справочник** по физико-техническим основам криогеники / под ред. М.П. Малкова. — Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1973.

Т.М. Воробьёва, студ.; рук. А.К. Ястребов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ЗАПЫЛЕННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Работа посвящена исследованию процесса объемной конденсации в парогазовом потоке, содержащем твердые частицы малого размера (пыль). Это делает возможной не только гомогенную конденсацию, но и гетерогенную, т.е. конденсацию на твердых частицах. Цель работы — анализ влияния распределения пылинок по размерам на изменение макро- и микропараметров вдоль потока. Рассматривалась следующая постановка задачи: смесь пара и газа движется в сверхзвуковой части сопла, на входе известна температура смеси и парциальные давления компонентов, при этом пар находится в состоянии насыщения, а число Маха равно единице. Для описания течения применялись уравнения механики сплошной среды, уравнения движения, неразрывности и энергии, уравнения баланса массы компонентов смеси и уравнения состояния идеального газа. Кинетика конденсации описывалась кинетическими уравнениями для функции распределения капель по размерам, записанными отдельно для гомогенной и гетерогенной конденсации.

Расчеты проводились для смеси водяного пара и воздуха для различных наборов параметров. Рассматривалось логнормальное распределение пылинок по размерам; средний размер твердых частиц, среднее квадратичное отклонение и массовая доля пыли варьировались. При малой запыленности потока данные, полученные для различных значений среднее квадратичного отклонения, отличаются незначительно. При увеличении массовой доли пыли, когда интенсивность гомогенной и гетерогенной конденсации становятся сопоставимыми или когда гомогенная конденсация подавляется, влияние среднее квадратичного отклонения на параметры потока увеличивается. Для значений среднего радиуса пыли 1 мкм и 10 мкм получены качественно одинаковые результаты. Количественно результаты, полученные при среднем размере 1 мкм, становятся близки к данным для 10 мкм при меньших значениях массовой доли пыли. Это связано с тем, что определяющим параметром является площадь поверхности пылинок, которая при одинаковой их массе уменьшается с ростом среднего радиуса.

Таким образом, необходимость в учете распределения пылинок по размерам возникает, когда вклад гетерогенного механизма объемной конденсации сопоставим или превосходит вклад гомогенного механизма.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания (проект 1886).

Е.А. Грозных, студ., рук. А.П. Крюков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИСПАРЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ПАРОГАЗОВУЮ СРЕДУ: ЗАВИСИМОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОТ СТЕПЕНИ ЕЕ НЕОДНОМЕРНОСТИ, ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ СОХРАНЕНИЯ

Испарение и конденсация частиц представляют собой два процесса, являющихся неотъемлемой частью нашей жизни. В быту эти процессы встречаются настолько часто, что мы считаем их само собой разумеющимися и, наблюдая какие-либо явления, сопровождающиеся этими процессами, даже не обращаем на них особого внимания. На самом же деле испарение и конденсация имеют огромное прикладное значение, т.к. лежат в основе множества технологических процессов и играют большую роль в природе. Особый интерес вызывают процессы испарения и конденсации, проходящие в сосудах, наполненных разными засыпками из гранул различных размеров.

В данной работе рассмотрены процессы испарения жидкости со свободных межфазных поверхностей из сосудов различной конфигурации. В ходе рассмотрения данной проблемы была изучена зависимость решения задачи об испарении жидкости в парогазовую среду от степени неоднородности задачи [1].

Аналитическое решение полной системы уравнений, включающей в себя уравнения диффузии, движения, неразрывности и уравнение энергии, является очень сложной задачей. В связи с этим в целях упрощения задачи в данной работе рассмотрена аналогия уравнения диффузии и уравнения теплопроводности [2].

Вторая часть данной работы посвящена решению уравнения диффузии с помощью указанной аналогии и численному решению полной системы уравнений с помощью пакета программ ANSYS Gambit и Fluent inc [3].

Литература

1. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. Учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
2. **Уонг Х.** Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Атомиздат, 1979. 216 с.
3. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективно-го теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003. 312 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ В ДЛИННЫХ КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Одним из направлений повышения эффективности низкотемпературных циклов является применение многокомпонентных рабочих тел (МРТ). Однако на данный момент процесс кипения и конденсации МРТ недостаточно изучен [1]. Следствием этого является отсутствие универсальной аналитической зависимости, описывающей подобные процессы [2]. Все существующие методы носят полуэмпирический характер и поэтому применимы только для конкретных условий. Авторами данной статьи произведен обзор работ по данной тематике и осуществлено сравнение существующих моделей с гомогенной моделью, которая по мнению авторов данной статьи дает качественно похожие результаты и в тоже время является более простой и удобной для применения. Изложено подробное описание гомогенной модели: условий ее применимости, карт режимов течений, определения теплофизических свойств рабочего тела. Также дается подробное описание конструкции экспериментального стенда и методики проведения исследований по определению коэффициента теплоотдачи при кипении МРТ.

Литература

1. **Masoud Asadi, Gongnan Xie, Bengt Sunden.** A Review of heat transfer and Pressure Drop Characteristics of Single and Two-phase Microchannels // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014.
2. **Yuan Wang, Zhen-guo Wang.** An Overview of Liquid-vapor Phase Change, Flow and Heat Transfer In Mini- and Micro-Channels // International Journal of Thermal Sciences. 2014.
3. **Sung-Min Kim, Issam Mudawar.** Review of Databases and Predictive Methods for Heat Transfer in Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flows // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА КЖ-1.6 ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ДРОССЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯ ПАРОЖИДКОСТНЫМ ТУРБОДЕТАНДЕРОМ

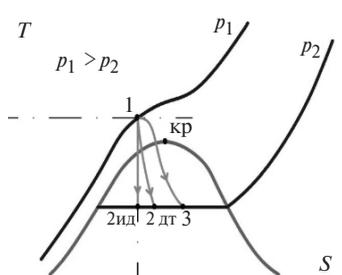


Рис. 1. Сравнение процессов расширения в дросселе (1—3) и в детандере (1—2дт) на T - S -диаграмме

В настоящее время продукты разделения воздуха нашли широкое применение в разных отраслях промышленности. Найдено немало технических решений, направленных на увеличение эффективности и качества проведения процесса разделения воздуха [1]. В современной криогенной технике успешно применяют расширительные машины — детандеры, предназначенные для охлаждения (понижения энтальпии) рабочего тела путем его расширения с отдачей внешней работы [2]. Как известно, процесс дросселирования по своей термодинамической эффективности уступает расширению с отдачей внешней работы (рис. 1).

В работе проанализировано повышение энергоэффективности установки Кж-1.6 путем замены дроссельного вентиля парожидкостным турбодетандером. Рассмотрены материально-тепловые балансы основных узлов криогенных циклов. Следует отметить, что замена не повлияла на нормальную работу остального оборудования. В итоге удалось понизить рабочее давление со 180 ата до 100 ата, что позволило снизить энергозатраты на получение 1 кг жидкого кислорода с 1,134 до 0,786 кВт·ч/кг при неизменных производительности и оборудовании. Полученный результат может быть использован для модернизации уже существующих Кж-1.6, а также при создании новых установок.

Литература

1. Архаров А.М., Смородин А.И. Криогенная техника: учебное пособие. Т 2. / под ред. А.М. Архарова. М.: Машиностроение, 1999.
2. Центростремительные турбодетандеры / А.Б. Давыдов, Г.А. Пересторонин, В.Л. Стулов, А.Н. Шерстюк; под общей редакцией В.Н. Удута. М.: Колос-Пресс, 2002.

*С.П. Левченко, А.Н. Шалаганова, ст. преподаватели;
рук. М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ УБЫЛИ ПРОДУКТОВ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ

Продукты, помещенные в холодильные камеры хранения без герметичной упаковки, с течением времени теряют массу. Происходит это вследствие испарения влаги с поверхности продуктов.

При усушке ухудшается качество продукта, т.к. в подсохшем поверхностном слое усиливаются окислительные и гидролитические процессы и этот слой в процессе хранения приобретает ненатуральные, несвежие вкус и запах.

Кроме того, испарившаяся с поверхности продукта влага оседает в виде снеговой шубы на поверхностях охлаждающих приборов, что приводит к снижению эффективности системы охлаждения [1].

Поэтому определение естественной убыли пищевых продуктов является актуальным, так как величина усушки позволяет проводить расчеты, на основании которых могут быть выбраны оптимальные условия низкотемпературного воздействия.

Были получены нормы усушки при замораживании белых грибов Восточно-Казахстанской области для различных температурных режимов (минус 18 °С, минус 24 °С и минус 30 °С).

Авторами проведена математическая обработка экспериментальных данных и получены аналитические зависимости для расчета норм усушки грибов при замораживании.

Полученные нормы допустимой естественной убыли (усушки) при замораживании уменьшаются с понижением температуры. Это можно объяснить тем, что при более низких температурах влага, содержащаяся в грибах, кристаллизуется быстрее в поверхностном слое, вследствие чего потери массы продукта снижаются. Причем нормы усушки для неупакованных продуктов примерно в три раза выше, чем для упакованных грибов, так как полиэтиленовая упаковка препятствует испарению влаги с поверхности продуктов.

Результаты работы могут быть использованы для расчета норм усушки белых грибов Восточного Казахстана при замораживании в интервале температур от минус 18 °С до минус 30 °С.

Литература

1. Тимофеева В.А. Товароведение продовольственных товаров: учебник. — Изд. 5-е, доп. и перер. Ростов н/Д: Феникс, 2005. 416 с.

П.А. Лыков, студ.; рук. В.И. Могорычный, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ДЕТАНДЕРНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Современное развитие технологий сжижения природного газа и его использования характеризуется двумя основными направлениями — крупнотоннажное и малотоннажное производство сжиженного природного газа (СПГ) [1].

Крупнотоннажное производство СПГ осуществляется в районе его добычи, доставка СПГ осуществляется морским транспортом для последующей его реализации потребителям с целью обеспечения стратегических интересов экономики государства.

При малотоннажном производстве СПГ сжижение газа производится на локальных установках (производительность — не более 10 т/час), расположенных вблизи газопроводов. Основная проблема развития малотоннажного производства СПГ обусловлена необходимостью адаптации и совершенствования существующих технологий сжижения газа к особенностям эксплуатации локальных установок (регулярное изменение термобарических параметров и состава сетевого газа) и достижения конкурентоспособной стоимости производства продукта с высокими потребительскими свойствами.

Исследование комплекса вопросов, связанных с повышением эффективности малотоннажного производства СПГ является актуальной научной проблемой, имеющей важное практическое значение.

В данной работе был исследован детандерный цикл для ожижения природного газа, позволяющий получать сжиженный природный газ с долей ожижения близкой к 1 ($0,95 \div 1$). Давление природного газа варьировалось в пределах от 0,6 до 3,0 МПа. В итоге было изучено влияние давления природного газа на ряд характеристик установки, определена ее эффективность [2], и выявлены ее недостатки. Особое внимание было уделено рассмотрению влияния давления на массовый расход хладагента и энергоёмкость установки.

Литература

1. **Чириков К.Ю., Рябова Т.С., Ворошилов В.П.** Производство сжиженного природного газа. Способы и оборудование. М.: ВНИИЭГАЗПРОМ, 1976.
2. **Горбачёв С.П.** Оценка эффективности производства СПГ на газораспределительных станциях / Технические газы. 2005.

*С.Қ. Саньязов, А.Ж. Нұрмұхаметова, студенты;
рук-ли С.П. Левченко, ст. преп.; А.Н. Шалаганова, ст. преп.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей)*

ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГРИБОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ХРАНЕНИИ

Свежие дикорастущие грибы, являются ценным белковым продуктом со значительным содержанием влаги, высокой активностью ферментов, поэтому не выдерживают длительного хранения без термической обработки.

В настоящее время большим спросом стали пользоваться замороженные продукты растительного производства [1]. Замороженные грибы полностью сохраняют свои питательные и вкусовые качества.

В оценке качества приоритетным методом является органолептический. При правильной постановке анализа он объективно и надежно дает общее впечатление о качестве продуктов.

Для проведения органолептической оценки качества была разработана 5-бальная шкала и определены категории качества для свежих и замороженных белых грибов Восточно-Казахстанской области.

В результате проведения исследований были получены комплексные показатели качества свежих и замороженных белых грибов при температуре минус 18 °С и различных сроках хранения. Проведена математическая обработка экспериментальных данных и получено уравнение регрессии для определения комплексного показателя качества.

Органолептическая оценка качества показала, что оптимальный срок хранения исследуемых образцов при температуре минус 18 °С — два месяца, так как при данных условиях хранения средний комплексный показатель качества имеет наибольшее значение.

Результаты работы могут быть использованы для определения оптимального температурно-временного режима хранения, обеспечивающего заданные показатели качества белых грибов Восточно-Казахстанской области.

Литература

1. Шишкина Н.С., Лежнева М.Л. Ассортимент быстрозамороженной овощной продукции и тенденции его развития // Производство и реализация мороженого и быстрозамороженных продуктов. 2006. № 3. С. 15—17.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В СОПЛЕ

Основной целью данной работы является комплексное исследование сверхзвукового истечения парогазовой смеси через сопло. В рамках этой задачи рассматривается влияние параметров сопла на истечение, дается оценка влияния распределения капель по температурам, а также приводится качественное и количественное сравнение с результатами экспериментов.

Исследование объемной конденсации осуществлялось с помощью решения кинетических уравнений методом прямого численного моделирования [1]. При решении рассматривается одномерное стационарное течение парогазовой смеси (вода-воздух) в сверхзвуковой части сопла. Для описания течения используются методы механики сплошной среды. Скорости жидкой и газообразной фаз одинаковы. Во входном сечении заданы температура смеси и парциальные давления компонентов, при этом пар является насыщенным, а скорость равна скорости звука.

Получены зависимости температур, степени пересыщения, числовой плотности и массовой доли капель от координаты для различных моментов времени. Показано, что угол раскрытия сопла определяет скорость расширения парогазовой смеси — при увеличении угла раскрытия снижение температуры и рост степени пересыщения ускоряются. Также было установлено то, что чем меньше давление газа, тем ближе к температуре насыщения температура капли, и чем больше давление газа, тем температура капли ближе к температуре газовой фазы. Учет распределения капель по температурам показал, что ввиду незначительного различия в результатах можно решать упрощенную задачу, учитывая лишь распределение капель по размерам. Проведено качественное и количественное сравнение с результатами экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания (проект 1886).

Литература

1. Корценштейн Н.М., Самуйлов Е.В., Ястребов А.К. Новый метод моделирования объемной конденсации пересыщенного пара // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 1. С. 89 — 100.

ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ ОХЛАЖДЕНИЯ СЖАТЫХ ГАЗОВ

Сжатые газы нашли широкое применение в различных областях промышленности. В процессе производства сжатых газов выделяется низкопотенциальное тепло, которое отводится системой охлаждения и рассеивается в атмосферу. При этом тепловая мощность, отведенная от компрессора, охлаждаемого водой в промежуточных охладителях, сопоставима с потребляемой им электрической мощностью [1]. Ранее было предложено использовать в качестве теплоносителя низкокипящие рабочие тела с последующей выработкой электроэнергии по органическому циклу Ренкина (ORC). В работе проведен расчет сжатия кислорода и азота при постоянной температуре на входе 20 °С. В результате расчета ORC определено количество вырабатываемой электроэнергии при использовании ряда отобранных фреонов в зависимости от степеней сжатия. Результаты расчетов представлены на рис.1.

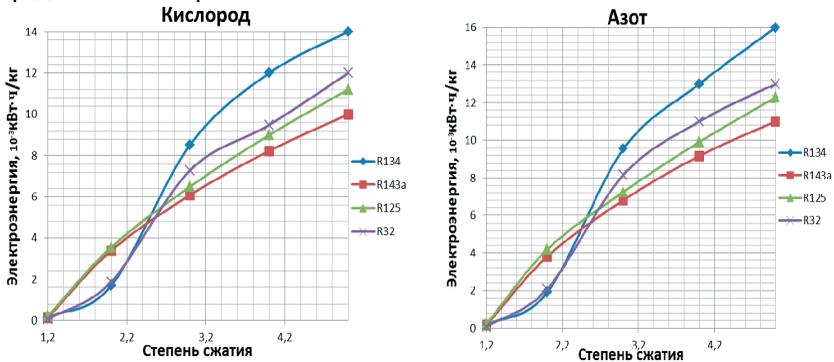


Рис. 1. Графики изменения выработки электрической энергии в зависимости от степени сжатия

Как видно из рис. 1, наибольшая электрическая энергия вырабатывается при охлаждении сжатого азота, а в зависимости от степени сжатия можно получить более $16 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч электроэнергии на каждый кг сжимаемого газа. Как для кислорода, так и для азота при переходной степени сжатия $x < 2,45$ наибольшая электрическая энергия вырабатывается при использовании фреона R125, а при $x > 2,45$ — R134a.

Литература

1. Сычков А.Е. Роль эффективных систем охлаждения в современных компрессорных установках. Мегаскаль, 2009.

*А.В. Самвелов, Д.В. Минаев, Н.Н. Оганесян, Д.А. Сысоев, аспиранты;
рук. Т.А. Алексеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЕРЖАТЕЛЕЙ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МИКРОКРИОГЕННОЙ СИСТЕМОЙ СТИРЛИНГА С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕГЕНЕРАТИВНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ

Приводятся результаты бесконтактного оптического контроля углового перемещения держателей матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) при охлаждении микрокриогенной системой Стирлинга (МКС) интегрального типа в процессе выхода на температурный режим криостатирования для оценки выбранных технологических решений.

Температурные перемещения матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) при охлаждении негативно сказывается на фотоэлектрических параметрах фотоприемных модулей (ФПМ). Важнейшим параметром криостатируемых МФПУ является величина углового отклонения МФЧЭ при охлаждении микрокриогенной системой и повторяемость значений этих величин в различных изделиях [1]. Преимущество метода — возможность осуществления бесконтактного оптического контроля углового перемещения держателя с установленной на нем матрицей фоточувствительных элементов на окончательном этапе изготовления изделия [2].

Метод реализуется автоколлимационным устройством контроля углового перемещения охладителя микрокриогенной системы Стирлинга и позволяет на разработанной установке бесконтактно с высокой точностью контролировать наклоны охладителя МКС (держателя имитатора МФПУ), вызванные деформацией при использовании комбинированного регенеративного теплообменника [3].

Литература

1. **Карагусов В.И., Карагусова Е.Е.** Оптимальные температурные диапазоны редкоземельных насадок регенераторов криоохладителей // Криогенное и холодильное оборудование и технологии. Омск. 1997. В№1. Ч№1. С. 122—129.
2. **Будневич С.С.** Расчет микрокриогенных установок Л.: Машиностроение, 1979. С. 49—55.
3. **Григорьев В.А., Крохин Ю.И.** Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники: учебное пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1982. С. 173—180.

Секция 42

НАНОТЕХНОЛОГИИ

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

А.С. Дмитриев

Секретарь секции — аспирант Д.В. Болтунов

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

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООКРУЖЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МОЛЕКУЛАМИ ПАВ

Одними из перспективных материалов нанопотоники являются углеродные нанотрубки. Появление методов, позволивших получать стабильные суспензии углеродных нанотрубок в водных дисперсиях поверхностно-активных веществ (ПАВ), привело к возможности управления оптическими характеристиками нанотрубок посредством изменения их микроокружения, создаваемого молекулами ПАВ. Направленное формирование микроокружения открывает возможности не только для создания материалов с заданными свойствами, но и для контролируемого изменения их электронных и фотофизических свойств.

В данной работе методом ядерного магнитного резонанса (^1H ЯМР) проведено экспериментальное изучение динамических процессов, происходящих при модификации поверхности углеродных нанотрубок молекулами ПАВ, знание которых необходимо для направленного формирования микроокружения. В качестве объектов исследования взяты нанотрубки, диспергированные в водных растворах трех ПАВ, различающихся природой противоионов — додецилсульфатов натрия, лития (исследованных нами ранее в [1]) и цезия. Проведен анализ концентрационных зависимостей химического сдвига резонансных линий ЯМР от ядер протонов, находящихся в различных частях молекул ПАВ, в диапазоне концентраций ПАВ от 1 мМ до 100 мМ при наличии и в отсутствие углеродных нанотрубок. Полученные данные указывают, что механизмы взаимодействия молекул ПАВ с поверхностью нанотрубок и структурные характеристики их микроокружения зависят от природы ПАВ. В частности, молекулы додецилсульфата натрия в основном взаимодействуют с поверхностью УНТ не

хвостовыми, а головными группами, поэтому можно предположить, что поверхности УНТ покрываются слоем сплюснутых мицелл. В других случаях более вероятна случайная бесструктурная адсорбция молекул ПАВ с полупорядоченным расположением головных и хвостовых групп, рыхлая для молекул додецилсульфатов лития или с облепляющими поверхность молекулами додецилсульфата цезия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-97055-р_поволжье_а).

Литература

1. **Borovskaya A.O., Idiyatullin B.Z., Zueva O.S.** The Adsorption of Sodium and Lithium Dodecyl Sulphate on the Carbon Nanotubes Surface: Research by Nuclear Magnetic Resonance // Proceedings of the VII International scientific conference: North Charleston (USA), 2015. P. 19—23.

Я.С. Волгин, студ.; рук. А.Ф. Гиневский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ НАНОЖИДКОСТИ ОТ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Динамика испарения достаточно давно изучается, и тем не менее, пока недостаточно исследованы такие явления, как сложная структура конвективных течений внутри жидкости или парогазовой среды и автоколебания вихревых образований, возникающих при испарении малых объемов жидкости.

Исследования указанных явлений востребованы при проектировании легковесных малогабаритных теплообменных аппаратов, работающих на принципе испарительного охлаждения на основе перспективных теплоносителей (в том числе — наножидкостных) [1].

Преимущества таких теплообменных аппаратов — низкая стоимость и энергоэффективность, простота конструкции и принципа действия.

Цель работы — изучение динамики испарения жидкостей- теплоносителей при различных параметрах парогазовой среды в начальный момент времени.

При помощи программного пакета Phoenics авторами была разработана компьютерная модель динамики испарения жидкостей- теплоносителей. С помощью разработанной модели рассчитывали температурные поля, поля концентрации пара и векторные поля скорости потоков смеси пара и воздуха (при этом для газовой среды задавались разные значения температуры и относительной влажности).

В результате проведенной работы обнаружили, что процесс испарения не может напрямую зависеть от состояния парогазовой среды, о чем свидетельствует хаотичное протекание испарения при монотонном изменении температуры и влажности среды.

Литература

1. Эльбуз Мустафа Али Мустафа Али. Исследование процессов теплообмена при испарении и кипении в простых и мезоскопических системах монодисперсных микросфер и мезотрубок: диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.03, 01.04.14; защищена 22.04.15: утв. 05.06.15 / Эльбуз Мустафа Али Мустафа Али; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ]. Москва, 2015. — 159 с.

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

ОСОБЕННОСТИ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ КАПЛЯМИ ЖИДКОСТИ НЕОДНОРОДНО НАГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В настоящее время недостаточно изучена проблема стекания капель жидкости по неоднородно нагретым подложкам различной морфологии [1, 2]. В данной работе создан экспериментальный стенд для исследования гистерезиса капель различных жидкостей, включая воду, изооктан, спирт, жидкий азот, органические и биоорганические жидкости, по неоднородно нагретым поверхностям с разными морфологиями. Капли исследуемых жидкостей с помощью специальных насадок опускаются на горизонтальные или наклонные (с контролируемым углом) поверхности различной морфологии. Подложка подвергается неоднородному нагреву. Контактные углы измеряются с помощью установки EasyDropKruss. В качестве подложек использованы нержавеющая сталь и полиимид.

Целью экспериментов является определение углов смачивания капель различных жидкостей при разных наклонах поверхности и при разных температурах, включая температуру, превышающую точку Лейденфроста. Основные параметры измерений: температура подложки, характерные химические и морфологические неоднородности, характерные углы смачивания, а также время перехода жидкости через границу раздела сред.

В ходе исследований гистерезиса с неоднородным нагревом были получены следующие условия, при которых капля способна перейти через границу раздела при температуре выше точки Лейденфроста:

- 1) разность температур ΔT полиимид-нержавеющая сталь ≈ 20 °С;
- 2) угол наклона подложки к горизонту $\alpha > 60^\circ$;
- 3) температура T металла при переходе капли через границу уменьшается не менее чем на 30 °С.

Также установлено, что скорости перехода капли с поверхности на поверхность зависят от массы капли, температуры нагрева поверхностей, морфологии поверхности и угла наклона.

Полученные результаты могут быть использованы как в исследованиях фундаментальных механизмов смачивания и растекания на неоднородных поверхностях, так и в прикладных задачах энергетике, охлаждении микроэлектроники, микрофлюидики и процессах сушки.

Литература

1. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. Изд. Лаборатория знаний. М.: БИНОМ. 2015. 736 с.
2. **Wettability** Switching Techniques on Superhydrophobic Surfaces / N. Verplanck, Y. Coffinier, V. Thomy et al. // *Nanoscale Res. Lett.* 2: 577–596. 2007.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФЕНА В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Графен обладает исключительными электрическими и механическими свойствами, что делает его весьма перспективным материалом для нано-электромеханических систем (НЭМС). В данной работе представлен датчик давления (рис. 1), в качестве мембраны (чувствительного элемента) которого выступает графен [1].

Интерес представляет чувствительный элемент НЭМС — область графена, находящаяся над полостью, вытравленной в пленке оксида кремния на кремниевой подложке. Графен также лежит на электрических контактах, а контакты, в свою очередь, объединены в мост Уитстона. Если существует перепад давления между окружающей средой и областью внутри вытравленной полости, то графеновая мембрана отклоняется от положения равновесия и таким образом ее состояние становится напряженным. Это приводит к изменению сопротивления области графена, находящейся над вытравленной полостью, что приводит к разбалансировке моста Уитстона. Таким образом, измеряя выходное напряжение моста, можно определить величину давления, действующего на мембрану.

По сравнению с традиционными датчиками давления, датчики давления, в качестве мембран которых выступает графен, демонстрируют на порядки большую чувствительность, а также обладают значительно меньшими габаритными и массовыми характеристиками.

Литература

1. Lemme Electromechanical Piezoresistive Sensing in Suspended Graphene Membranes / A.D. Smith, F. Niklaus, A. Paussa et al. // Nano Lett. 2013. 13 (7). P. 3237—3242.

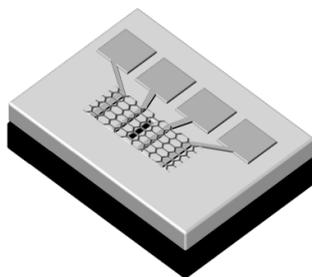


Рис. 1. Конструкция датчика давления

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСЫХАНИЯ МАССИВОВ КАПЕЛЬ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ

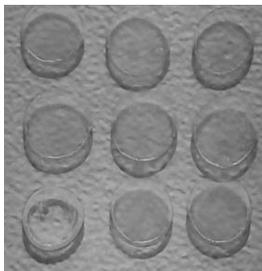


Рис. 1. Массив из девяти одинаковых капель

В предыдущих работах авторов [1] основное внимание уделялось высыханию коллоидных растворов, лежащих на твердой гидрофильной поверхности в форме одиночной капли. В настоящем исследовании исследовались массивы одиночных капель, приведенных друг с другом во взаимодействие. Причем взаимодействие получалось как изначально, когда две рядом лежащие капли соединялись «перешейком», так и впоследствии, после полного высыхания первоначального массива отдельных капель (рис. 1). В таком случае между двумя рядом находящимися круговыми осадениями наносилась третья капля того же объема. Кроме того, возможно другое ориентирование вторичного массива, когда объединяются осадки четырех капель, лежащих в вершинах воображаемого квадрата.

Нанесение капель растворов выполнялось с помощью жестко закрепленного на штативе автоматического дозатора. Точное ориентирование достигалось использованием предметного микрометрического столика.

В работе проведено моделирование процесса высыхания исследуемых массивов капель, за основу взяты механизмы, описанные в [2]. Исследовано изменение характера растрескивания различных видов массивов при варьировании температуры подложек, влажности окружающей среды и других параметров, влияющих на напряжения, возникающие в соприкасающихся каплях.

Литература

1. Alexander Dmitriev, Petr Makarov, Optical Methods for Studying the Drying Dynamics of Fe_2O_3 Nanocolloid Droplets Depending on Variation of Substrate Temperature // 2015 International Conference on Fluid Dynamics: proceedings of the conference: (Orlando, Florida, 2015). D-24. P. 6.
2. Tadashi Kajiya, Cecile Monteux, et. al. Contact-Line Recession Leaving a Macroscopic Polymer Film in the Drying Droplets of Water-Poly(N,N-dimethylacrylamide) (PDMA) Solution // Langmuir 2009. 25(12). P. 6934—6939.

Направление
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —
зав. каф. АСУ ТП, д.т.н.,
профессор А.В. Андриюшин

Секция 43

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

М.В. Валявский, студ.; рук. М.В. Фоменко, асс. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ИНВЕРТНОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ С ТШУ ДЛЯ КОТЛА НА УЛЬТРАСУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

Развитие промышленности страны невозможно без увеличения производства электроэнергии. Это обстоятельство, с учетом возрастающей привлекательности с экономической точки зрения угольного топлива, делает актуальной проблему повышения эффективности работы угольных ТЭС. Увеличения КПД ТЭС можно достичь повышением начальных параметров пара, которые бы превышали максимально достигнутые на сегодняшний день в нашей стране сверхкритические параметры, что требует разработки соответствующей котельной установки.

На кафедре ТЭС НИУ «МЭИ» разработан котел на ультрасуперсверхкритические параметры пара ($p_{пе} = 35$ МПа и $t_{пе} = 710$ °С) с промпрегревом ($p_{пп} = 7,2$ МПа, $t_{пп} = 720$ °С) для работы в блоке мощностью 1000 МВт. Котел имеет инвертную топочную камеру и М-образную компоновку газоходов (на выходе из топочной камеры дымовые газы делятся на два потока, проходящие последовательно подъемный наклонный газоход, и вертикальный нисходящий газоход, и далее следующие в РВП). При этом затраты на паропроводы составляют значительную часть капитальных затрат.

Инвертная топочная камера позволяет снизить потери с механическим недожогом, уменьшить долю уноса золы, снизить отметку выходного коллектора острого пара, что, в свою очередь, снижает протяженность паропроводов острого пара до ЦВД турбины и тем самым позволяет снизить капитальные вложения. Сжигание твердого топлива в топке организовано с применением прямоточных горелочных устройств и сопел, требующих

детальной проработки аэродинамики топочной камеры, что может быть достигнуто лишь с применением модельных исследований.

Современный уровень компьютерной техники позволяет проводить данные исследования с помощью программных комплексов вычислительной гидродинамики на высоком уровне и с достаточной точностью [1].

Применение прямоточных горелочных устройств с должной организацией аэродинамики инвертной топки позволяет достигнуть высоких показателей экологичности и эффективности работы котельной установки.

Литература

1. **Chung T.J.** Computational Fluid Dynamics // Cambridge university press, 2002.

ВЛИЯНИЕ ШУМА КРЫШНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ НА УРОВНИ ЗВУКА В ОКРУЖАЮЩЕМ РАЙОНЕ

Согласно проекту документа «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», разработанного Министерством энергетики Российской Федерации в 2015 году, приоритетной технологией отечественной разработки для крупномасштабного применения на крупных ТЭЦ являются теплофикационные парогазовые установки (ПГУ). Крышные вентиляторы, используемые для вентиляции помещений главного здания ПГУ, являются одним из наиболее интенсивных постоянных источников шумового воздействия на жилую зону.

В [2] показана возможность использования специализированной программы Predictor для проведения акустических расчетов и оптимизации размещения жилого района относительно ТЭЦ. Для исследования шумового воздействия на окружающий жилой район в зависимости от расположения главного здания ПГУ в программе Predictor была построена трехмерная модель (3D), позволяющая рассчитать изолинии уровней звука согласно [1] с учетом отражения и экранирования. Были рассмотрены три варианта размещения главного здания ПГУ на территории ТЭЦ.

По результатам акустических расчетов крышных вентиляторов можно сделать следующие выводы:

- производственные здания и сооружения на территории ТЭЦ, а также сами жилые дома оказывают существенное влияние на распространение шума за счет отражения и рассеивания падающих на них звуковых волн, создавая за собой «звуковую тень»;

- использование специализированных программ для проведения акустических расчетов позволяет выбрать наиболее благоприятное местоположение источников шума на территории ТЭЦ, которое обеспечивает наименьшие уровни звука на территории жилой застройки;

- различные варианты размещения главного корпуса ПГУ определяют различные уровни звука в жилом районе, в которых будет различаться требуемое снижение шума и как следствие затраты на внедрение мероприятий по снижению шума;

- в ряде расчетных точек, несмотря на сокращение расстояния до главного здания ПГУ, наблюдается снижение уровней звука.

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.

2. **Визуализация шумового загрязнения от ТЭС** / В.Т. Медведев, В.Б. Тупов, А.А. Тараторин и др. // Электрические станции. 2014. №3.

*А.Е. Волков, О.О. Титов, К.О. Кубатулина, студенты;
рук. Б.Л. Шельгин, к.т.н., проф. (ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СХЕМЫ РАСЧЕТА КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА «П-102» ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

Материал предназначен для проведения лабораторных занятий с будущими бакалаврами и магистрами по профилю подготовки «Тепловые электрические станции».

Расчетная модель выполнена с использованием простой в обращении и доступной для самостоятельной работы студентов программы «ТРАКТ».

Схема расчета котла-утилизатора (КУ) «П-102» включает газовый, водопаровой, воздушный тракты и тракт сетевой воды. Все рабочие тракты представляют собой цепочки последовательно расположенных и пронумерованных элементов.

Универсальная схема позволяет выполнить расчет КУ «П-102» в трех режимах его работы: утилизация теплоты газов ГТУ-6П (1), утилизация теплоты газов при дополнительном сжигании топлива (2), автономная работа КУ при остановленной ГТК-6П (3).

Расчетная модель объекта учитывает отвод количества теплоты от продуктов сгорания ГТУ-6П для поддержания требуемых параметров газов на входе в КУ.

В проектном варианте при температуре наружного воздуха 15 °С коэффициент избытка воздуха за ГТУ принят 4,5. При этом температура газов в утилизационном режиме на входе в КУ составляет 515 °С.

Апробация разработанной модели подтверждает правильность принятых методических решений при хорошем соответствии полученных результатов проектным данным энергоустановки (табл. 1).

Таблица 1

Наименование характеристик	Расчетные режимы		
	1	2	3
Паропроизводительность КУ, т/ч	20	50	50
Температура уходящих газов, °С	107	117	100
Расход топлива в ГТУ, м ³ /ч	2375	2375	-
Расход топлива в КУ, м ³ /ч	-	2168	3800
КПД КУ (брутто), %	80,1	88,1	95,0

Созданная модель расчета КУ позволяет при изменении его конструктивных характеристик выполнить исследование влияния электрической мощности ГТУ, температуры наружного воздуха, паропроизводительности КУ и доли байпасирования газов на выходные показатели анализируемого объекта.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОВ ПУТЕМ ИХ ПЕРЕВОДА С РЕЖИМА ЖИДКОГО ШЛАКОУДАЛЕНИЯ НА ТВЕРДОЕ

Жидкое шлакоудаление (ЖШУ) применяется для повышения устойчивости горения и снижения величины механического недожога при сжигании слабореакционных топлив, либо для исключения шлакования поверхностей котла при сжигании топлива с низкой температурой плавления золы. При эксплуатации котлов, работающих с ЖШУ, имеют место следующие проблемы: высокие выбросы оксидов азота в атмосферу, обусловленные температурами газов в камере сгорания на уровне, необходимом для вывода шлака в жидком состоянии; малый регулировочный диапазон, т.к. минимальное значения нагрузки определяется устойчивостью выхода жидкого шлака; наличие потерь теплоты с физическим теплом шлака q_6 . Поэтому актуальной задачей является модернизация котлов с ЖШУ и проработка возможности их перевода на твердое шлакоудаление (ТШУ). Рассмотрим, например, котел марки ТП-87 с ЖШУ, на котором имеют место высокие концентрации оксидов азота, достигающие до $1100-1200 \text{ мг/м}^3$, при нормативном значении 700 мг/м^3 [1], низкий КПД, минимальная нагрузка составляет 75-80 % от номинала. Специалистами МЭИ проработаны варианты реконструкции этого котла с организацией твердого шлакоудаления и сжигания угольной пыли в прямоточно-вихревом факеле. Для реализации ТШУ необходима реконструкция топки и организация высокоэффективного ступенчатого сжигания топлива при использовании прямоточных горелок и сопел, которое позволит повысить устойчивость горения топлива, обеспечить низкие значения минимальных нагрузок, исключить возможность шлакования котла и значительно снизить выбросы оксидов азота.

На основе экспериментальных зависимостей [2] определено, что после реконструкции ТП-87 будут достигнуты следующие наиболее вероятные показатели его работы: потеря теплоты с механическим недожогом топлива $q_4 = 1 \%$, концентрация оксидов азота в уходящих газах $\text{NO}_x = 310 \text{ мг/м}^3$, минимальная нагрузка без подсветки факела $D_{\text{мин}} = 275 \text{ т/ч}$. Таким образом, будет обеспечена высокая комплексная эффективность работы котла.

Литература

1. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996.
2. Киричков В.С., Прохоров В.Б., Архипов А.М. Разработка и исследование технологии сжигания кузнецкого каменного угля на котлах ТП-87 при их переводе на твердое шлакоудаление // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 1.

К.И.Дементьев, студ.; рук. Д.В.Чугунков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ШУМА КРЫШНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ЦТП

В наше время все больше внимания уделяется снижению неблагоприятных воздействий от работы промышленности на человека. Одним из таких воздействий является шум от объектов энергетики, который превышает санитарные нормы на территории окружающего района. Особенно это важно для энергетических объектов, находящихся рядом с жилыми районами.

В данной работе был рассмотрен центральный тепловой пункт (ЦТП), в составе которого шумоизлучающее оборудование, которое делает его источником определенного шумового воздействия на жилые дома при их близком расположении. Необходимо было определить влияние шума вентиляционного оборудования, а именно трех крышных вентиляторов. Излучение шума от крышных вентиляторов связано с аэродинамической природой генерации звуковых волн. Интенсивность излучения шума зависит от типа крышных вентиляторов (осевые, центробежные), мощности, частоты вращения рабочего колеса и других факторов.

Проведенный акустический расчёт выявил превышения санитарных норм [1], которое составило 2,2—12,3 дБ в диапазоне среднегеометрических частот 250—2000 Гц. Расчет был проведен по методике, изложенной в [2].

Для уменьшения шума было рассмотрено два метода: снижение шума заменой трех мощных крышных вентиляторов на шесть менее мощных и снижение шума путем установки на три крышных вентилятора глушителей шума.

Результаты расчетов показали, что снижения шума до допустимых значений достигается только при установке глушителей шума, разработанных в НИУ «МЭИ» [3]. Установка глушителей шума способствует улучшению аэродинамических характеристик крышных вентиляторов за счёт уменьшения гидравлических потерь от внезапного расширения потока воздуха на выходе из нагнетательного тракта вентиляторов.

Литература

1. **СН 2.2.4/2.1.8.562-96.** Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России.
2. **ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996).** Шум. Затухание звука при распространении на местности. М.: Стандартинформ, 2006
3. **Сейфельмлюкова Г.А., Чугунков Д.В., Суслов А.В.** Снижение шума от крупных городских ЦТП в условиях реконструкции // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Защита от повышенного шума и вибрации». (Санкт-Петербург, 18—20 марта 2015 г.)

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

УРОВНИ ШУМА ВОЗЛЕ РТС ПОСЛЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МЕР ПО ШУМОГЛУШЕНИЮ

Шум от оборудования районных тепловых станций (РТС) может быть источником превышения санитарных норм [1-3]. Например, акустическое обследование РТС «Нагатино», проведенное в 2002 г. показало превышение санитарных норм от срезов дымовых труб котлов, воздухозаборов дутьевых вентиляторов, а также дефлекторов ГРП. Для снижения шумового воздействия от РТС «Нагатино» было принято решение об установке глушителей шума на всех четырех водогрейных котлах ПТВМ-60, их воздухозаборах, а также дефлекторах ГРП. Все мероприятия по шумоглушению были выполнены по рекомендациям МЭИ и реализованы в 2002—2004 гг..

Например, для снижения шума среза трубы в верхней части котла сразу над пакетом перегревателя был установлен пластинчатый глушитель. Снижение уровня шума в глушителе происходит за счет поглощения звуковой энергии материалами, которыми наполнены пластины глушителя. Акустические испытания показали, что глушители имеют необходимую акустическую эффективность. Снижение уровня шума в среднем составило 1,4—24,7 дБ во всем диапазоне нормируемых среднегеометрических частот.

Результаты акустических измерений, проведенные в окружающем районе сразу после осуществления мер по шумоглушению показали соответствие санитарным нормам.

Проведенные акустические измерения рядом с РТС «Нагатино» больше чем через десять лет в сентябре 2015 г. также показали соответствие санитарным нормам.

Полученные результаты позволяют рекомендовать глушители шума котлов ПТВМ-60 для газовых и воздушных трактов, а также дефлекторы для установки на других РТС.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. **Тупов В.Б.** Газовоздушные тракты паровых котлов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

АНАЛИЗ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ГТУ-ТЭЦ ПРИ НАЛИЧИИ ДРУГИХ ИСТОЧНИКОВ ШУМА

В настоящее время общество все большее внимание уделяет снижению неблагоприятных воздействий от работы промышленных и энергетических предприятий на человека — одним из таких воздействий является шум.

Перспективным направлением развития современной энергетики является использование газотурбинных установок (ГТУ), обладающих большим количеством неоспоримых достоинств и преимуществ [1]. Однако их эксплуатацию осложняет тот факт, что ГТУ являются самым мощным постоянным источником шума среди всего энергетического оборудования [2], что делает практически невозможным их применение на энергообъектах, находящихся в пределах городской черты, без применения специальных мероприятий по шумоглушению. Все это обуславливает актуальность изучения вопросов, связанных с шумовым излучением от ГТУ.

В работе рассматривается ГТУ-ТЭЦ с четырьмя блоками ГТУ с котлами-утилизаторами, расположенная в непосредственной близости от жилой застройки. Особенностью данного жилого района является размещение рядом с ним и ГТУ-ТЭЦ еще одного мощного источника шума — крупного промышленного предприятия. В этом случае свой вклад в акустический фон вносят сразу несколько источников и важной задачей становится определение требуемого снижения шума от каждого из них.

Для решения этой задачи было проведено комплексное акустическое обследование селитебной территории, которое состояло в проведении измерений при разных режимах работы и разной нагрузке ГТУ-ТЭЦ, включая режим ее полного отключения. Анализ полученных результатов позволил определить как вклад ГТУ-ТЭЦ в акустический фон, так и источники шума на ГТУ-ТЭЦ и требуемое снижение шума от них с целью достижения санитарных норм по фактору шума в окружающем жилом районе как в дневное, так и в ночное время.

Внедрение мероприятий по борьбе с шумом от выявленных источников ГТУ-ТЭЦ позволит добиться требуемого снижения шума от ГТУ-ТЭЦ, а рассмотренный подход является эффективным и в других случаях с размещением нескольких источников шума недалеко друг от друга.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательство МЭИ, 2002.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

А.А. Егоров, студ.; рук. В.С. Киричков, к.т.н., ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Основной способ хранения твердых бытовых отходов (ТБО) — их складирование на полигонах. Хотя полигоны исчерпывают свой лимит, складирование продолжается ввиду того что количество отходов не уменьшается. Поэтому в настоящее время в мире особо остро выделяется проблема утилизации ТБО. Самое распространенное решение этой проблемы — использование мусоросжигательных (МСЗ) и мусороперерабатывающих заводов. Но этот вид утилизации не имеет большого успеха, т.к. МСЗ не являются самокупаемыми и существуют только за счет господдержки.

ТБО нашли применение в виде топлива для выработки пара, тепловой и электрической энергии, но, к сожалению, данный вид утилизации мало развит нашей в стране и поэтому мало изучен. Отсюда и возникает ряд нерешенных экологических и технико-экономических проблем, таких как разброс данных о характеристиках топлива, подготовка ТБО к сжиганию, высокотемпературная коррозия, низкотемпературная коррозия, очистка уходящих газов и др. [1].

Большую проблему при эксплуатации котельного оборудования представляет низкотемпературная коррозия, интенсивность которой ограничивает снижение температуры уходящих газов, и как следствие, ограничивает повышение КПД и снижение себестоимости при производстве энергии.

Использование ТБО в качестве топлива на энергетических котлах является перспективным направлением, так как помимо окупаемости за счет продажи энергии, бюджет будет пополняться за счет финансирования со стороны государства. Станции, отвечающие современным экологическим требованиям, можно строить вблизи густо заселенных районов. Стоит отметить, что по сравнению с рынком энергоресурсов, практически отсутствует сильное колебание цен на эти отходы. ТБО являются восполняемым источником энергии, на 2013 г. в России скопилось более 90 млрд т отходов, и ежегодно эта цифра увеличивается на 3 млрд т. Таким образом, можно заключить, что при разработке энергетических котлов на ТБО важной задачей является обеспечение оптимального баланса между КПД, экономическими и экологическими показателями и интенсивностью коррозионных процессов.

Литература

1. **Рекомендации** по проектированию и эксплуатации заводов по сжиганию твердых бытовых отходов. М.: Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1987.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТОПКЕ КОТЛА С НИЖНИМ ДУТЬЕМ

Применение нижнего воздушного дутья в котлах с камерными топками с твердым шлакоудалением позволяет улучшить выгорания топлив, углубить помол угольной пыли, сделать топку устойчивой к колебаниям характеристик топлива. Накоплен значительный опыт эксплуатации таких котлов (схемы [1], [2]), однако в указанных схемах имеются недостатки. Для схемы [1]: повышенные избытки воздуха в топке, эрозия экранных труб холодной воронки; для схемы [2] — ограничение сжиганием бурых углей и лигнитов в котлах с мельницами-вентиляторами.

В данной работе используется численное моделирование как эффективный, а зачастую единственно возможный способ исследования процессов, протекающих в теплоэнергетическом оборудовании. К его достоинствам следует отнести возможность моделирования широкого спектра процессов (аэродинамика, тепло- массообмен, горение) и средства визуализации результатов расчета.

Исследуется новая схема, заключающаяся в расположении сопл нижнего дутья на стенках шлакового комода в шахматном порядке с наклоном вверх, а угольная пыль подается через встречно-смещенные прямооточные горелки, расположенные в 1—2 яруса с наклоном вниз.

С помощью численного моделирования определено влияние следующих параметров на топочную аэродинамику и выгорание частиц: фракционный состав топлива, шаг и угол наклона сопл нижнего дутья, угол наклона горелок, доля избытка воздуха в горелки и на сопла нижнего дутья. Для каждого варианта схемы проведены расчеты для монофракционного топлива разных диаметров с целью определения максимально возможного размера частицы. Кроме этого проводился расчет для полифракционной угольной пыли с различной тонкостью помола R_{90} . По результатам расчетов выявлена оптимальная схема топки с точки зрения механического недожога, тонкости помола и надежности работы.

Литература

1. **Опыт** применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220-100 / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Р.Г. Аношин и др. // Энергетик. 2009. №1.

2. **Загруднинов Р.Ш.**, Нагорнов А.Н., Нагорнов Н.А., Шитова С.Н. Опыт модернизации устаревшего котельного оборудования с целью повышения их единичной мощности и улучшения технико-экономических и экологических характеристик // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1 (2).

РАЗРАБОТКА МЕР ПО СНИЖЕНИЮ ШУМА ОТ ВОЗДУХОЗАБОРОВ ГТУ МЕТОДОМ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Широкое применение газотурбинных установок (ГТУ) в энергетике России заставляет задуматься о защите окружающей среды от негативных воздействий технологических процессов, протекающих в установках данного типа. Основным фактором физического воздействия, характерным для ГТУ, является шум.

В настоящее время распространенными методами снижения шума на пути его распространения являются экранирование источника шума и различные виды глушителей [1]. Использование звукопоглощающих экранов имеет ряд положительных особенностей: простота монтажа, минимальные затраты ресурсов на содержание, возможность установки экранов на малых площадях на уже действующих объектах.

Работа посвящена снижению шума от воздухозаборов ГТУ посредством установки звукопоглощающих экранов на действующей ГТУ-ТЭЦ, находящейся в непосредственной близости от жилой застройки. По методике [2] выполнен расчет требуемой акустической эффективности экранов для соблюдения санитарных норм на окружающей ГТУ-ТЭЦ селитебной территории.

Рассматриваемые источники шума находятся на расстоянии около 100 м до ближайшего жилого дома, что предъявляет дополнительные требования к достижению допустимого уровня шума. Жилой дом является многоэтажным, поэтому экраны должны обеспечивать комфортные условия проживания по фактору шума на всех этажах. Так как режим работы энергопредприятия круглосуточный, то должны соблюдаться санитарные нормы, как в дневное, так и в ночное время.

Для снижения шума от воздухозаборов ГТУ предложена установка четырёх звукопоглощающих экранов на крыше машинного зала ГТУ — по одному экрану около каждого воздухозабора. Высота каждого экрана составляет около 5 м, длина — около 8 м. Предложенные мероприятия по шумоглушению позволят обеспечить требуемое снижение шума от рассматриваемых источников.

Литература

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

А.П. Маркелов, студ.; рук. Д.В.Чугунков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ШУМА, ПРОНИКАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ РЕШЕТКИ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЦТП

Рассмотрен конкретный пример центрального теплового пункта (ЦТП), который находится внутри плотной жилой застройки. При таком расположении оборудование ЦТП оказывает шумовое воздействие на жилой район. Выполнен акустический расчет шумового воздействия [1], по результатам которого было выявлено превышение допустимого уровня звукового давления (УЗД).

Основным источником проникающего шума являются решетки приточной вентиляции, через которые распространяется шум насосного оборудования [2]. Превышение допустимых норм составило от 0,09 дБ до 8,99 дБ на среднегеометрических частотах 500-8000 Гц.

Рассмотрены несколько вариантов уменьшения шума от решеток приточной вентиляции, включающие замену насосного оборудования на менее шумные, установку кожухов, а также применение шумозащитных экранов для решеток приточной вентиляции. Замена насосов и установка кожухов потребует больших капитальных и временных затрат ввиду большого количества насосного оборудования, поэтому данные варианты являются в данном случае нецелесообразными. Наиболее экономически выгодным вариантом является установка специальных звукопоглощающих экранов [3].

В соответствии с требуемым снижением уровня шума был выбран шумозащитный экран конструкции НИУ «МЭИ», имеющий необходимую акустическую эффективность. Снижение шума экраном обеспечивается за счёт ослабления звука специальной конструкцией звукопоглощающей облицовки с повышенным коэффициентом звукопоглощения, а также за счёт изменения направленности излучения звука в окружающий жилой район. Результаты расчетов уровня шума с установленным экраном на решетках приточной вентиляции показали отсутствие превышений допустимых норм во всех расчетных точках около ближайших жилых домов.

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.
2. **Иванов Н.И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. М.: Университетская книга, Логос, 2008.
3. **Юдин Е.Я.** Борьба с шумом на производстве: Справочник. М.: Машиностроение, 1985.

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

СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ ДЫМОСОСОВ КРУПНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Шум, излучаемый от газовых трактов дымососов является источником превышения санитарных норм как для территории энергетических предприятий, так и окружающего жилого района [1—5]. Одним из возможных способов является установка в газовых трактах глушителей.

Общими требованиями к шумоглушителям энергетических предприятий являются: необходимое снижение уровня шума во всем диапазоне, учитывающее специфику излучаемого шума от источника; минимальное гидравлическое сопротивление; надежная эксплуатация при относительно высоких температурах и в условиях возникновения низкотемпературной коррозии; минимальные вес и габаритные размеры, позволяющие разместить глушитель в существующих конструкциях; удобство монтажа и эксплуатационного осмотра; низкие капитальные затраты.

В настоящей работе рассмотрено использование различных глушителей в зависимости от перечисленных выше требований для снижения шума от срезов дымовых труб дымососов крупного металлургического предприятия. Здесь рассмотрены три варианта. Для первого варианта для снижения шума осевого дымососа ДОД-28 рекомендуется установка пластинчатого глушителя на горизонтальном участке газохода до дымовой трубы. Во втором варианте устанавливается глушитель на подъемном участке. Здесь предполагается установить сложный глушитель: цилиндрический глушитель совмещен здесь с кулисным глушителем. В третьем случае предлагается установить целый комплекс устройств: пластинчатый глушитель, звукопоглощающие пандусы и др. Такой комплекс устройств позволяет не только уменьшить шум от дымососа на необходимую величину, но и уменьшить аэродинамическое сопротивление газового тракта за счет его аэродинамической оптимизации.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. **Тупов В.Б.** Газовоздушные тракты паровых котлов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
4. **Тупов В.Б.** Комплекс мероприятий по снижению шума от ТЭС// Электрические станции. 2013. № 3. С. 26—31.
5. **Tupov V.** Absorptive Silencers of Forced-Draft Fans with Improved Performance // 22-th International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, July 12—16, 2015.

Е.К. Мусатаев, С.К. Жумажан, студенты; рук. О.А. Степанова, к.т.н., доц. (ГУ им. Шакарима, г. Семей, Казахстан)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

От правильной организации оборудования районных котельных и ТЭЦ зависят общие затраты на производство тепловой и электрической энергии. Для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы как основного, так и вспомогательного оборудования, энергетических систем проводятся мероприятия, направленные на снижение общих затрат на производство. Предлагаются наиболее эффективные методы оценки степени совершенства термодинамических циклов. Эксергетический метод анализа находит все большее применение, эксергетический КПД используют для анализа потерь работоспособности рабочего тела непосредственно в элементах установки. Данным исследованиям посвящены работы многих авторов [1, 2].

В исследовании использовались энергетический и эксергетический методы анализа работы энергетического оборудования, работающего на различном твердом топливе (каменный и бурый уголь).

Проведен тепловой расчет котлов, работающих на буром и каменном угле. Определены объемы продуктов сгорания, значения энергетических и эксергетических КПД. Получена диаграмма энергетических потоков.

Полученные результаты дают возможность определить термодинамическую эффективность котельного агрегата при работе на различных видах угля.

Предложения по дальнейшим исследованиям — провести эксергетический анализ для вновь вводимого оборудования.

Литература

1. **Эксергетический** анализ новых котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС / Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, Ф.А. Серант и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2009. № 2. С. 331—340.
2. **Ильин Р.А.** К проблеме оценки эффективности теплоэнергетических технологий в промышленной энергетике // Вестник АГТУ. 2005. № 6. С. 223—228.

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

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРОДА СЕМЕЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Город Семей — один из крупнейших городов Республики Казахстан. Топливо-энергетический сектор представлен ТЭЦ и многочисленными районными котельными, которые ежегодно выбрасывают в атмосферу десятки тонн загрязняющих веществ. По данным инвентаризации источников выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от источников ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей наибольшее количество выбросов приходится на пыль неорганическую, оксид углерода, диоксид серы и азот [1]. Взвешенная в воздухе пыль адсорбирует ядовитые газы, образует смог, который увеличивает количество осадков. Насыщенные сернистыми, азотистыми и другими веществами, эти осадки образуют агрессивные кислоты [2].

Полученная зависимость накопления загрязняющих веществ в ветках зеленых насаждений от фактора сезонности, включающего климатические особенности территории, будет отражать действительную картину загрязнения города в настоящее время.

Исследования проводились авторами в испытательной региональной лаборатории инженерного профиля «Научный центр радиэкологических исследований» города Семей. Были исследованы образцы веток деревьев, расположенных вблизи ТЭЦ и котельных города Семей. Построены графики по результатам исследований.

В результате работы был изучен качественный и количественный состав выбросов от теплоснабжающих предприятий города Семей в зависимости от времени года, исследовано содержание тяжёлых металлов в ветках растений вблизи котельных города Семей.

Результаты работы могут быть предложены к включению в структуру мониторинга атмосферы как объективного показателя состояния городской среды.

Литература

1. **Проект** нормативов ПДВ для ГКП «Теплокоммунэнерго» ГУ «Отдел жилищно-коммунального хозяйства, пассажирского транспорта и автомобильных дорог Семей» на праве хозяйственного ведения. Семей -2012.

2 **Лавров С.Б.** Глобальные проблемы современности: часть 1. СПб.: СПбГУПМ, 1993. 72 с.

*А. Е. Ниязбеков, студ.; рук. М. В. Ермоленко, к.т.н.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей, Казахстан)*

ВЛИЯНИЕ ТОНИНЫ ПОМОЛА УГЛЯ «КАРАЖЫРА» НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ

Исследованию эффективности, надежности, экономичности, экологичности и безопасности работы энергетического оборудования посвящено большое количество работ. Износ оборудования может привести к аварии и сбою работы всей технологической цепи. Использование в качестве топлива угля приводит к золотому износу поверхностей нагрева, что вызвано сложными физико-химическими процессами. Модернизация производства, замена оборудования, переход с одного топлива на другое требует изучения устойчивости оборудования в новых условиях работы [1, 2]. Для борьбы с нежелательными отложениями на поверхностях оборудования, определения периодичности очистки необходимо тщательно исследовать характер протекания процесса сжигания топлива и характера образования отложений, который зависит от состава золы.

В работе использовались экспериментальные и теоретические методы по наблюдению за топочным режимом и составом летучей золы.

Был определен характер отложений на конвективных поверхностях нагрева и состав летучей золы водогрейного котла, работающего на местном топливе.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании золотых отложений и эрозионного износа конвективных поверхностей в зависимости от качества используемого топлива.

Предложения по дальнейшим исследованиям — изучить качественный состав золотых отложений котлов.

Литература

1. **Беляев С.А., Литвак В.В., Солод С.С.** Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. — Томск: Изд-во НТЛ, 2008 — 218 с.
2. **Кузнецов Г.В., Таратушкина Г.В.** О механизме локальной эрозии элементов газового тракта котлов частицами летучей золы // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 5. С. 106—110.

СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ ГТУ-ТЭЦ ПРИ ПОМОЩИ ДИССИПАТИВНЫХ ГЛУШИТЕЛЕЙ

Физическое воздействие энергетического оборудования в виде шума является неотъемлемой частью его штатной эксплуатации [1]. Особенно важно учитывать данный фактор в жилых районах, где располагаются ГТУ-ТЭЦ — такой случай описан в данной работе. ГТУ-ТЭЦ не является единственным источником шума в рассматриваемом окружающем районе, но оказывает существенное влияние на уровень шума на селитебной территории, превышающий действующие санитарные нормы [2].

Для определения уровня шумового воздействия было проведено акустическое обследование ГТУ-ТЭЦ, находящейся в непосредственной близости от жилых домов. Анализ полученных результатов позволил установить, что основными источниками шума от ГТУ-ТЭЦ являются воздухозаборы газотурбинных установок (ГТУ). Также шум распространяется через срезы устьев дымовых труб пиковых водогрейных котлов (ПВК), располагающихся на территории ГТУ-ТЭЦ.

Для снижения уровня шума, излучаемого четырьмя компрессорами ГТУ через воздухозаборы, находящиеся над уровнем крыши машинного зала ГТУ, была предложена установка глушителей шума, которые врезаются в воздухопроводы непосредственно перед компрессорами ГТУ.

Для снижения шума в мировой практике используются в основном глушители диссипативного типа: они обеспечивают широкополосное ослабление звука при относительно малых потерях давления [1]. Разработанный глушитель шума воздухозаборов ГТУ состоит из пяти пластин, заполненных звукопоглощающим материалом, обладает умеренным аэродинамическим сопротивлением и не приводит к снижению производительности ГТУ. В качестве звукопоглощающего материала используется материал на основе супертонкого базальтового волокна.

Установка пластинчатых глушителей шума воздухозаборов ГТУ позволяет уменьшить шумовое воздействие на окружающий ГТУ-ТЭЦ район до значений, не превышающих санитарные нормы [2]. Снижение шума от ПВК также может быть достигнуто за счет установки диссипативных глушителей шума в газовых трактах: от котлов до устьев дымовых труб.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **СН 2.2.4/2.1.8.562-96.** Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.

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

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА «П-88» В СОСТАВЕ ПГУ-325

Разработка выполнена для практических и лабораторных занятий при подготовке бакалавров и магистров направления «Теплоэнергетика и теплотехника».

Поставленная задача выполнялась с помощью программного продукта «ТРАКТ», который при достаточной точности позволяет получить желаемые результаты.

Модель котла-утилизатора (КУ) «П-88» состоит из газового, воздушного (фиктивного) и водопаровых трактов высокого и низкого давлений (ВД и НД), представляющих комбинации последовательно расположенных элементов. Деаэратор энергоблока и газовый подогреватель конденсата КУ условно разделены на две части, отдельно включенные в схемы трактов ВД и НД.

Расчетная схема предусматривает включение в газовый тракт количества теплоты воздуха при его нагреве в осевом компрессоре газовой турбины «ГТЭ-110».

В качестве топлива используется природный газ, расход которого в камеру сгорания ГТУ предварительно рассчитывается с использованием многофакторной зависимости.

Учитывается условное разделение газотока газового подогревателя конденсата на отдельные участки рабочих трактов ВД и НД.

В проектном варианте при температуре наружного воздуха 15 °С коэффициент избытка воздуха перед КУ принят 3,25.

При этом температура газов на входе в КУ составляла 525 °С.

Расчетные характеристики КУ «П-88» при проектной температуре наружного воздуха 15 °С:

- | | |
|--|-------------|
| - расход воздуха в ГТУ | 359 кг/с |
| - паропроизводительность контура ВД/НД | 160/40 т/ч |
| - давление пара за контуром ВД/НД | 7,3/0,7 МПа |
| - температура пара за контуром ВД/НД | 483/228 °С |
| - температура уходящих из КУ газов | 105 °С |

Полученные результаты хорошо согласуются с рабочими показателями, заявленными проектировщиком котлоагрегата.

Разработанная система расчета КУ позволяет при изменении конструктивных характеристик поверхностей нагрева выполнить анализ влияния электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха на экономические показатели и значения расходов, температур трактов ВД и НД.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ШУМА ТЭЦ НА УРОВЕНЬ ЗВУКА ОТ НЕГО

В [1—3] отмечается, что высота расположения источника шума над уровнем земли влияет на уровень звука от него в окружающем районе. В зависимости от высоты расположения источника уровень звука от него может снижаться за счет экранирования препятствиями или увеличиваться за счет отражений. До настоящего времени влияние высоты расположения источника шума на ТЭЦ на уровень звука от него в окружающем районе в достаточной мере не исследовалось.

Поставленная задача решалась сравнением влияния высоты расположения источника на уровень звука от него в окружающем жилом районе на примере ТЭЦ-20 филиала ПАО «Мосэнерго». Акустические расчеты проводились с использованием программы Predictor, которая позволяет рассчитывать затухание шума, в том числе в сложной промышленной и жилой застройках, в соответствии с действующими нормативными документами [1]. Расчеты проводились при расположении источника шума на следующих отметках: 1,5 м, 15 м, 39 м.

Анализ результатов акустических расчетов показал, что, максимальные уровни звука около жилых домов наблюдаются при расположении источника шума на отметке 39 метров. В этом случае звук распространяется практически беспрепятственно и не затухает за счет естественных и искусственных препятствий. При расположении источника шума на отметке в 1,5 метра уровень звука около жилых домов будет минимален, так как источник шума экранируется строениями, находящимися на территории станции и в жилом районе. При расположении источника шума на отметке в 15 метров уровень звука около жилых домов имеет промежуточные значения по сравнению с рассматриваемыми ранее вариантами. Даются рекомендации по ориентации источников шума по отношению к селитебной территории.

Литература

1. **ГОСТ 31295.2—2005** (ИСО 9613-2:1993). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Общий метод расчёта. М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 2007.
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательство МЭИ, 2012.
3. **Визуализация шумового загрязнения от ТЭС** / В.Т. Медведев, В.Б. Тупов, А.А. Тараторин, Б.В. Тупов // Электрические станции. № 3. 2014.

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

СРАВНЕНИЕ ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРОВЫХ СБРОСОВ

Возможность использования существующих энергетических объектов и построение новых во многом определяется эффективностью шумоглушения его излучателей шума. Наиболее интенсивными источниками шума являются сбросы пара в окружающую среду, которые происходят при растопках энергетических котлов, подрывах предохранительных клапанов промперегрева и главных предохранительных клапанов и других случаях [1]. Уровень звука при сбросе пара достигает почти 140 дБА, что значительно превышает допустимые нормы для производственных зон, так и территории жилой застройки. Поэтому использование паровых глушителей является обязательным условием.

Конструкция парового глушителя зависит от многих факторов: от характеристик сбрасываемой среды, условий эксплуатации, места сброса и других факторов [2].

Рассматриваются различные зарубежные и отечественные конструкции паровых глушителей [1-3]. Приведено сравнение различных схем шумоглушения. Показаны общие моменты в конструкциях шумоглушителей, которые используются при различных схемах шумоглушения. Особое внимание уделено на отличиях в конструкциях паровых глушителей.

Паровые выбросы пара при парокислородной продувке котлов являются также очень сильным источником шума. Такие выбросы пара содержат большое количество твердых частиц и продолжаются длительное время, что так же влияет на выбор системы шумоглушения.

Показано, что выбор конструкции глушителя или схемы парового шумоглушения должен проходить не только из учета акустической эффективности глушителя, но и пропускной способности глушителя, а также его массы.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М: Издательство МЭИ, 2005.
3. **Тупов В.Б., Тараторин А.А.** Новые паровые глушители МЭИ // Электрические станции. 2015. № 6.

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

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ХОЛДИНГА ПАО «РАО ЭС ВОСТОКА»

В 2014 году в природоохранном законодательстве РФ произошли значительные изменения [1], которые предусматривают резкое увеличение экологических платежей за негативное воздействие на окружающую среду при превышении технологических нормативов. Вместе с тем, при внедрении наилучших доступных технологий (НДТ) и выполнении технологических нормативов предусматривается значительное сокращение платежей вплоть до компенсации затрат на внедрение НДТ.

В холдинге ПАО «РАО ЭС Востока» проведен анализ роста экологических платежей до 2020 года, связанных с вступлением в силу Федерального закона от 21.07.2014 №219-ФЗ. По предварительному анализу экологические платежи могут увеличиться более чем на 85 %, примерно на 800 млн руб. по сравнению с 2014 годом. Изменения в природоохранном законодательстве могут привести к серьезным потерям прибыли энергокомпаний Холдинга.

Для снижения риска потерь прибыли и уровня негативного воздействия на окружающую среду, необходима разработка системного подхода осуществления природоохранной деятельности энергокомпаний. Так, в пяти компаниях ПАО «РАО ЭС Востока» в 2015 году была внедрена «Система экологического менеджмента» (СЭМ) в соответствии со стандартом ISO 14001:2004 «Системы экологического менеджмента». В 2016 году планируется внедрение СЭМ в остальных крупных шести компаниях. Начальным этапом внедрения системного подхода является идентификация экологических аспектов, при которой осуществляется получение объективных данных о воздействии на окружающую среду, и возможность контроля данного воздействия. В ПАО «РАО ЭС Востока» идентификация экологических аспектов проводилась с использованием балльной методики оценки воздействия, т.е. суммой баллов по определенным экологическим критериям с учетом уровня управления (контроля) экологическим аспектом.

Внедрение системного подхода совместно с данной методикой позволило сократить потери прибыли Холдинга на 14,7%, включая сверхлимитные платежи и штрафы за невыполнение законодательства. Недостатком внедряемых методик идентификации экологических аспектов может являться субъективность оценки существенности экологических аспектов.

Литература

1. **Федеральный закон** «Об охране окружающей среды»/ Собрание законодательства РФ.2002 № 2.

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

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ИСТЕЧЕНИЯ ПАРОВОЙ СТРУИ НА КОНСТРУКЦИЮ ШУМОГЛУШИТЕЛЯ

Необходимость установки паровых глушителей регламентируется рядом нормативных документов, обязывающих устанавливать их на трубопроводах паровых выбросов. Разработка эффективных конструкций глушителей для различных параметров пара является актуальной задачей. При помощи математического моделирования в программе Ansys Fluent исследованы механизмы генерации шума паровой струей при дозвуковом, сверхзвуковом и околосзвуковом режимах. Для изучения истечения паровой струи использовалась трехмерная нестационарная модель, позволяющая проследить регулярные и когерентные структуры в потоке. Моделирование истечения паровой струи проводилось из конечного участка трубопровода длиной 0,5 м с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 0,257$ м. Температура пара изменялась в диапазоне от 396 до 505°C, степень нерасчетности от 1 до 8,2, расход — от 5 до 90 кг/с соответствующим режиму истечения.

При дозвуковом режиме истечения смешение пара с атмосферным воздухом начинается сразу после выхода струи из трубопровода. Для околосзвукового режима истечения характерно образование начального участка в струе, на котором не происходит перемешивание пара с атмосферным воздухом. В этих режимах возможно применение диссипативных глушителей. При сверхзвуковом режиме истечения на начальном участке паровой струи возникает система скачков уплотнения, и поэтому в конструкции глушителя появляется дросселирующее устройство для их устранения и плавного снижения давления до атмосферного [1].

С учетом данных моделирования разработаны глушители шума [2] недорасширенных и изобарических паровых струй. На разработанный глушитель шума для недорасширенных паровых струй получен патент [3]. Восемь глушителей внедрены на двух котлах ТГМ-96А ТЭЦ-8 филиала ПАО «Мосэнерго». Результаты испытаний глушителя показали его высокую акустическую эффективность — 30,5 дБА при массе глушителя 950 кг. Глушитель для изобарических струй установлен на выхлопном трубопроводе выброса пара от БРОУ 140/13 ТЭЦ-9 ПАО «Мосэнерго».

Литература

1. **Тупов В.Б., Тараторин А.А.** Результаты математического моделирования паровой струи, истекающей в атмосферу при различных режимах, влияющих на шумообразование // Теплоэнергетика. 2015. №5.
2. **Тупов В.Б., Тараторин А.А.** Новые паровые глушители МЭИ // Электрические станции. 2015. №6.
3. **Патент** на полезную модель 143480 РФ. Глушитель шума выхлопа пара / В.Б. Тупов, А.А. Тараторин. Заявка №2013155538/06, 13.12.2013.

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

СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ ВОЗДУХОЗАБОРОВ КРУПНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Снижение шума, излучаемого от воздухозаборов, является актуальной проблемой для многих, особенно крупных энергетических предприятий. Это обусловлено тем, что воздухозаборы являются источником превышения санитарных норм, как для территории предприятий, так и окружающего жилого района [1—3]. Источниками шума могут являться дутьевые вентиляторы, компрессоры и другое оборудование.

В работе проводится сравнение снижения шума путем установки глушителей в воздушном тракте и установкой экрана перед воздухозабором компрессора. Требования к глушителям воздушных трактов и экранам включают в себя следующее: высокую акустическую эффективность при минимальном гидравлическом сопротивлении; минимальные вес и габаритные размеры, позволяющие разместить глушитель в существующих конструкциях; удобство монтажа и эксплуатационного осмотра; низкие капитальные затраты.

Рассмотрено использование различных глушителей и экранов в зависимости от перечисленных выше требований для снижения шума воздухозаборов на примере крупного энергетического объекта. Сравнение позволяет определить достоинства и недостатки от использования глушителей и экранов в каждом случае.

Показано, что установка глушителя в воздухозаборном тракте позволяет не только уменьшить шум от него, но в определенных случаях уменьшить аэродинамическое сопротивление за счет оптимизации воздушного тракта. Экономический эффект от уменьшения расходов на собственные нужды может составлять сотни тысяч рублей.

Установка экранов на воздухозаборах, например, компрессоров не связана с выводом из эксплуатации оборудования. Акустический эффект от установки экрана не связан при соблюдении определенных требований с дополнительным аэродинамическим сопротивлением. Конструкции экранов просты и не требуют больших капитальных вложений.

Литература

1. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Издательство МЭИ, 2005
2. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. **Тупов В.Б.** Газовоздушные тракты паровых котлов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

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

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ПАРОВОГО КОТЛА ТПП-210А ТЭЦ-22 ПАО «МОСЭНЕРГО» НА ТШУ С УВЕЛИЧЕНИЕМ ЕГО ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

На ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» планируется замена выработавшего свой ресурс турбоагрегата блока ст. № 9 Т-250/300-240 на Т-295/335-23,5 УТЗ с увеличением расхода пара в голову турбины с 950 т/ч до 1030 т/ч. Это повлечет за собой реконструкцию работающего с этой турбиной двухкорпусного парового котла ТПП-210А.

Котел ТПП-210А спроектирован для работы на природном газе, мазуте и кузнечком тощем угле с жидким шлакоудалением. В настоящее время при работе котла на угле существует превышение нормативной величины концентрации оксидов азота (NO_x) в дымовых газах (700 мг/м^3 [1]) примерно в 2,5 раза. При этом для поддержания стабильного горения пылеугольного факела производится его подсветка природным газом.

Увеличение паропроизводительности котла при сохранении существующих габаритов топочной камеры приведет к повышению температуры в зоне активного горения топлива, а значит и к увеличению образования термических оксидов азота, что по новому природоохранному законодательству (ФЗ № 219 от 21.07.2014 г.) приведет к резкому увеличению платы за выбросы в атмосферу оксидов азота.

На кафедре ТЭС разработана схема сжигания твердого топлива в топке котла ТПП-210А, которая предполагает перевод котла на твердое шлакоудаление (ТШУ), организацию эффективного ступенчатого сжигания топлива с оптимизацией аэродинамики топки. Аэродинамика топочной камеры организована таким образом, чтобы обеспечить надежную бесшлаковочную работу топки котла, что потребовало проведения модельных исследований, а также тепловых расчетов. Модельные исследования аэродинамики топочной камеры были выполнены с помощью современного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent.

Предлагаемая схема сжигания твердого топлива с использованием прямооточных горелочных устройств и сопел с ТШУ может позволить повысить паропроизводительность котла до требуемой величины, а также снизить выбросы оксидов азота до нормативной величины для ТШУ, составляющей 350 мг/м^3 [1].

Литература

1. ГОСТ Р 50831—95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1996, 24 с.

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

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА В КОТЛЕ БКЗ-160-140

Динамичный рост народного хозяйства приводит к ускоренному потреблению всех видов ресурсов (материальных, энергетических, финансовых и пр.) За последнее десятилетие мировое потребление нефти, газа и угля возросло почти вдвое, а потребность в энергии удваивается каждые 12-14 лет [3]. Динамика развития новых месторождений не позволяет в полной мере восполнять постоянно растущий спрос на энергоносители, а разведанные запасы топлива стремительно уменьшаются.

Все это приводит к истощению месторождений органического топлива. Поэтому в настоящее время все больше внимания уделяется качественным аспектам производства электроэнергии, а именно научно-техническому прогрессу, ресурсосбережению, рациональному природопользованию. Снижение расхода энергоносителя на местах его потребления позволит существенно снизить нагрузку на топливное хозяйство страны, тем самым обеспечить более экономичное и качественное производство электроэнергии. При этом рациональное использование топливных ресурсов позволит оказывать меньшее негативное влияние на воздушный бассейн страны [1, 2].

В работе иллюстрируется один из способов рационализации расхода природного газа на примере сжигания топлива в котле БКЗ-160-140. Исследования базируются на анализе различных вариативных параметрах организации сжигания топлива, таких как нагрузка, количественный состав горючего топлива. В ходе изыскания был получен оптимальный коэффициент воздуха, для минимизации расхода природного газа в энергетических котлах с выработкой необходимого количества энергии. Как следствие улучшается экономичность котельного агрегата. Для оценки основных показателей котла при сжигании топлива использована программа «ТРАКТ».

Литература

1. **Хзмалян Д.М., Каган Я.А.** Теория горения и топочные устройства. М: Энергия, 1976.
2. **Чебоксаров В.И.** Направление совершенствования экономико-стратегических и технологических аспектов системы использования газового топлива // Научно-технический сборник. 1995. № 9—10.
3. **Данилов О.Л.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М: Издательский дом МЭИ, 2010.

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

ШУМ ОТ ГРАДИРЕН В ОКРУЖАЮЩЕМ ТЭЦ РАЙОНЕ

В настоящее время градирни большой производительности применяют в системе оборотного водоснабжения для охлаждения теплообменных аппаратов (на ТЭС, АЭС). Их широкое использование обусловлено тем, что для их размещения требуется значительно меньшая площадь по сравнению с другими типами охладителей. В нашей стране получили применение противоточные градирни с естественной тягой.

Одновременно градирни являются интенсивными источниками шумового воздействия на окружающий район. Основная часть звуковой энергии излучается градирней через входные окна. Шум в градирнях вызывает свободное падение воды. У градирен, где для интенсификации охлаждения используют вентиляторы, наряду с шумом падения воды существует шум, излучаемый вентиляторами.

Вместе с повышением единичной мощности турбин растёт и производительность градирен. Проведено сравнение шумовых характеристик градирен разного типа и производительности. В соответствии с [1] выполнены расчеты УЗД от шума градирен ТЭЦ разной мощности. Рассмотрены возможные мероприятия по снижению шума различных градирен [2-3]. Для охлаждения воды рекомендуется использовать малошумные вентиляторы: тихоходные вентиляторы с большим диаметром лопастей. Для снижения шума на путях распространения используются диссипативные глушители. Чтобы снизить уровень излучаемой звуковой энергии, изготавливают бассейны с дном конусообразной формы, обеспечивающей стекание воды к краям бассейна градирни. Возможным способом снижения шума от градирен является установка экрана. Рассчитаны геометрические характеристики экранов, позволяющих уменьшить шум от градирен с естественной тягой. Рассмотрено снижение шума при промышленном озеленении с использованием деревьев и кустарников.

Литература

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

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

ШУМ ОТ ТЭЦ В ОКРУЖАЮЩЕМ РАЙОНЕ ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Энергетическое оборудование ТЭЦ является сильным источником шума для окружающего района. Нормальная эксплуатация этого оборудования может являться причиной превышения санитарных норм в окружающем районе в радиусе нескольких километров [1, 2]. Поэтому эксплуатация энергетического оборудования ТЭЦ без внедрения мероприятий по снижению шума невозможна. Особенно проблема шума актуальна для ТЭЦ, которые находятся в городах рядом с большими жилыми районами.

В рамках энергетической стратегии России на период до 2035 г. предусмотрен вывод из эксплуатации физически изношенного и морально устаревшего оборудования. В Московском регионе планируется реконструкция блоков на базе турбины Т-250/300-240, что предполагает замену основного и вспомогательного оборудования и установку турбины нового образца Т-295/335-23,5 производства ЗАО «УТЗ». Максимальная мощность новой турбины может достигать 335 МВт. Поэтому увеличение мощности основного и вспомогательного оборудования ТЭЦ приведет к увеличению уровня шума от них.

Выполнены акустические расчеты в соответствии с требованиями стандарта (ГОСТ 31295.2—2005) для ТЭЦ с различной мощностью для определения уровней звукового давления со среднегеометрическими частотами 63—8000 Гц на границе санитарно-защитной зоны.

Выполненные с использованием программы «Predictor» фирмы «Softnoise» акустические расчеты позволили определить величины требуемого снижения для различного типа оборудования в зависимости от мощности ТЭЦ.

На основе проделанных расчетов рассмотрены возможные мероприятия по снижению шума для различных групп оборудования [2, 3].

Литература

1. **Тупов В.Б.** Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. **Тупов В.Б.** Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Издательство МЭИ, 2005.
3. **Тупов В.Б.** Газовоздушные тракты паровых котлов: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

Д.А. Юпатов, студ.; рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСНОВАНИЯ К ПОВЫШЕНИЮ ДОЛИ УГЛЯ НА ТЭС

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

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

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

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

Литература

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

Секция 44

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЭС И АЭС

Председатель секции — к.т.н., доц. О.В. Егошина
Секретарь секции — вед. инж. А.В. Очков

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

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА УДЕЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ СВЕРХЧИСТОЙ ВОДЫ

Специфика химического контроля в тепловой и атомной энергетике обусловлена исключительно высокой чистотой контролируемой среды. Удельная электропроводимость (УЭП) теплоносителя на атомных электростанциях — около 0,06 мкСм/см — приближается к значениям теоретически чистой воды 0,055 мкСм/см. На вновь возводимых станциях в РФ требования к качеству воды более жесткие по сравнению с качеством воды на паросиловых энергоблоках, что подтверждает значение электропроводимости воды и пара ПГУ составляющее 0,2 мкСм/см [1].

Измерение удельной электропроводимости сверхчистых вод, как правило, осуществляется в потоке контролируемой среды с помощью автоматических кондуктометров, что исключает влияние загрязняющих веществ, способных попасть из воздуха (в первую очередь — углекислого газа).

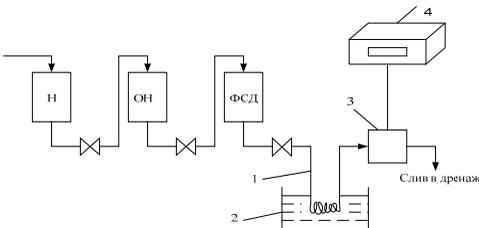


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — трубка из нержавеющей стали; 2 — термостат; 3 — датчик кондуктометра; 4 — кондуктометр

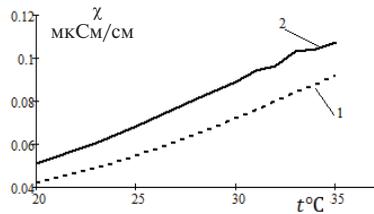


Рис. 2. Зависимость УЭП сверхчистой воды от температуры:
1 — расчетная; 2 — экспериментальная

В работе приведена зависимость УЭП сверхчистой воды от температуры и выполнено сравнение расчета с результатами эксперимента на установке (рис. 1) в лабораторных условиях. Связь между УЭП и температурой определяется формулой Кольрауша:

$$\chi_t = \chi_{25}[1 + \alpha_t(t - 25) + \beta_t(t - 25)^2], \quad (1)$$

Эксперимент по изучению влияния температуры на удельную электропроводимость был проведен в диапазоне 20...35 °С.

Как видно из рис. 2, экспериментальная зависимость отличается от расчетной, что обусловлено присутствием посторонних ионов в сверхчистой воде. Таким образом, показано влияние температуры и посторонних ионов на УЭП сверхчистой воды в лабораторных условиях.

Литература

1. **Ларин Б.М.** Состояние технологии подготовки водного рабочего тела на отечественных ТЭС // Теплоэнергетика. 2014. № 1. С. 75—80.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОЗИРОВАНИЯ ФОСФАТОВ В БАРАБАН КОТЛА ТГМ-96 ТЭЦ-23 ОАО «МОСЭНЕРГО»

На большинстве электростанций с барабанными котлами высоких параметров для коррекции водно-химического режима котловой воды применяется фосфатирование. В основном, контроль за качеством котловой воды производится вручную, что не позволяет оперативно реагировать на отклонение отдельных показателей качества воды от нормируемых значений. Поэтому встает вопрос о контролируемых показателях качества котловой воды и использованием приборов автоматического химического контроля.

Для перехода от ручного контроля за содержанием фосфатов в котловой воде к автоматическому контролю была проведена математическая обработка полученных экспериментальных данных, которая установила, что существует следующая функциональная зависимость: концентрация фосфатов — функция удельной электропроводности для первого чистого отсека правой стороны [1].

На основании этого была предложена следующая структурная схема управления насосом дозатором фосфатов, представленная на рис. 1.

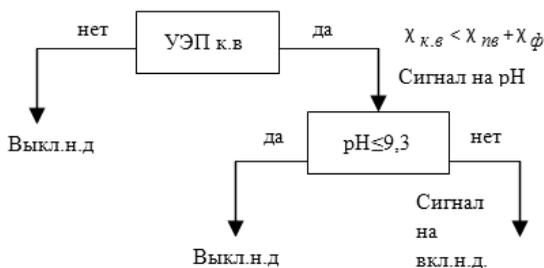


Рис. 1. Схема автоматического дозирования фосфатов

Литература

1. Исследование влияния концентрации фосфатов в котловой воде на электропроводность и рН / Т.И. Петрова, В.И. Кашинский, А.Е. Верховский и др. // Теплоэнергетика. 2007. № 7. С. 6—9.

*Аунг Ту Мое, асп. (НИУ «МЭИ»);
П.М. Готовцев, к.т.н. (НИЦ Курчатовский институт);
рук. А. Е. Верховский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СИСТЕМ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЭС С БАРАБАННЫМИ КОТЛАМИ

Надежная и экономически эффективная работа тепловых электрических станций (ТЭС) является приоритетной задачей современной энергетики. В связи с этим в настоящее время значительное внимание уделяется проблемам оптимизации водно-химического режима (ВХР) и методов его контроля и поддержания. К сожалению, работа большинства применяемых систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) ВХР ограничивается представлением оперативному персоналу химического цеха ТЭС текущих значений контролируемых параметров автоматического химического контроля (АХК) и лабораторного химического контроля (ЛХК). При этом основная задача СХТМ — оптимизация ВХР и недопущение его нарушений и/или отклонений от установленных норм.

Целью данной работы являлась разработка технологических алгоритмов «советов оператору» при нарушениях ВХР с целью их использования в автоматизированной системе управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) Казанской ТЭЦ-2.

При разработке алгоритмов были учтены особенности тепловой схемы, ВХР и системы АХК, а также АСУ ТП Казанской ТЭЦ-2. Создание алгоритмов производилось на базе опыта эксплуатации ТЭС с учетом характерных нарушений и действий, направленных на их устранение, описанных в инструкции по ведению ВХР Казанской ТЭЦ-2. Особое внимание уделялось существующему приборному парку АХК и объему лабораторных измерений. Использование при реализации алгоритмов данных как АХК, так и ЛХК позволяет более детально проанализировать возникшее нарушение и более точно выявить его причины.

Разработанные алгоритмы должны работать в режиме реального времени и могут быть реализованы в большинстве существующих программных пакетов, применяемых в АСУ ТП и СХТМ.

Ю.В. Богатырёва, асп.; рук. Т.И. Петрова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ С ПАРОГАЗОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Одной из причин повреждения оборудования котлов-утилизаторов на тепловых электрических станциях с парогазовыми установками является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) конструкционных материалов. Опыт эксплуатации зарубежных ТЭС показывает, что основные повреждения котлов-утилизаторов как в однофазной, так и в двухфазной среде, происходят в контурах низкого давления, которые работают в диапазоне температур 150—170 °С [1]. В этом диапазоне температур магнетит имеет наибольшую растворимость. Многими учеными в различных странах мира процесс развития ЭКИ рассматривается как совокупность трех процессов: электрохимическая коррозия, растворение защитного слоя магнетита и механическое воздействие на защитный слой или металл.

В настоящее время на ТЭС с ПГУ используются следующие водно-химические режимы: аммиачный, гидразинно-аммиачный в конденсатно-питательном тракте; для коррекции качества котловой воды используется Na_3PO_4 и NaOH . На некоторых тепловых электрических станциях применяются комплексные реагенты различных марок [2, 3].

На тепловых электрических станциях с парогазовыми установками производятся частые пуски-остановы, в процессе которых может увеличиваться концентрация примесей в паре, что приведет к образованию отложений в проточной части паровых турбин. В докладе представлены зависимости по качеству теплоносителя, полученные при пуске энергоблоков на тепловых электрических станциях с парогазовыми установками, которые могут быть использованы для оценки процессов массопереноса примесей в пароводяном тракте.

Литература

1. **Sieben A., Stanley L.** HRSG Designs and Their Effect on FAC Risk // Int. Conference Flow-accelerated Corrosion (FAC) in Fossil and Combined Cycle Plants. June 29 (July 01, 2010. Washington DC). P. 1.1—1.22.

2. **Петрова Т.И.,** Фурунжиева А.В. Использование хеламина на тепловых электростанциях с барабанными котлами // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 1. С. 3—8.

3. **Богачёв А.Ф.** Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок электрических станций // Электрические станции. 2006. № 7. С. 33—36.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДОЗИРОВАНИИ АММИАКА НА ТЭС

На тепловых электростанциях (ТЭС) используются системы дозирования корректирующих реагентов, которые позволяют облегчить работу оперативного персонала ТЭС и оптимизировать их подачу. Именно поэтому в данной работе было выполнено исследование системы автоматического дозирования реагента с позиции влияния типовых возмущений на динамику автоматического дозирования корректирующих реагентов. Одним из распространенных видов нарушений водного режима является ухудшение качества обрабатываемой воды [1].

Изучение влияния возмущения на динамику системы дозирования реагентов было проведено на экспериментальном стенде, моделирующем работу системы управления водным режимом близкую к условиям на реальных энергетических объектах. Эксперимент заключается в получении переходного процесса системы автоматического дозирования аммиака при ухудшении качества обрабатываемой воды в контуре установки. Были получены переходные процессы системы автоматического дозирования аммиака, представленные на рис. 1, двумя способами: экспериментальным без учета ухудшения качества пробы и расчетно-аналитическим на основе математической модели с учетом возмущения по ухудшению качества пробы воды.

Необходимо отметить, что при эксплуатации анализаторов необходимо учитывать изменение динамических свойств анализаторов в случае использования их в автоматических системах дозирования реагентов в тракт энергоблока ТЭС.

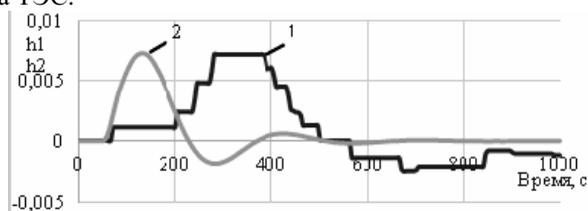


Рис. 1. Переходные процессы системы автоматического дозирования аммиака:
1 — экспериментальный без учета ухудшения качества пробы; 2 — аналитический с учетом ухудшения качества пробы

Литература

1. Воронов В.Н., Петрова Т.И. Проблемы организации водно-химических режимов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2002. № 7. С. 2—6.

*А.Ю. Будаева, асп.; рук-ли Е.Н. Бушуев, д.т.н, доц.;
Е.В. Зайцева, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЮЩИХ СВОЙСТВ КИСЛОТНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ОЧИСТОК ПАРОВЫХ КОТЛОВ

В России при эксплуатационных химических очистках труб поверхностей нагрева паровых котлов широко используются специализированные моющие кислотные ингибированные композиции как зарубежного, так и российского производства. Имеющийся опыт их применения свидетельствует о зависимости моющих свойств реагентов от структуры и состава отложений, наличии у поставщиков рекомендаций по использованию и отсутствию у них соответствующих технологических регламентов, а также необходимости предварительной лабораторной проверки моющих реагентов на образцах загрязнённых труб.

В группу кислотных моющих средств, находящих спрос в энергетике России и характеризующихся как эффективные, входят Дескалер и МСК (Белоруссия, ЗАО «ГД ХЕМИКС»), AugePROAc (Россия, г. Казань, ООО «ПК МАХИМ»). Выполнена лабораторная проверка моющих свойств этих средств. Пробные кислотные очистки длительностью до 8 суток проведены в нагретых неподвижных и подвижных (с перемешиванием магнитной мешалкой, а также при циркуляции на промывочном стенде) растворах. Получены опытные данные по скоростям очистки поверхностей стали в моющих растворах. Они были использованы для разработки математической модели и технологических регламентов эксплуатационных химических очисток паровых котлов.

Моющий эффект химических реагентов в значительной мере обусловлен диспергированием отложений [1]. Удаление из застойных зон очищаемого контура скоплений шлама, состоящего из диспергированного вещества отложений, является неизбежной операцией. Пароводокислородная обработка [2], проводимая после химической очистки, обеспечит доочистку и пассивацию труб, что не менее важно, чем удаление из контура скоплений шлама, образовавшихся при предварительной химической очистке.

Литература

1. Химические очистки теплоэнергетического оборудования. Вып. 2 / под ред. Т. Х. Маргуловой. М.: Энергия, 1978. 175 с.
2. СТО ВТИ 37.005-2013. Методические указания по эксплуатационной пароводокислородной очистке и пассивации внутренних поверхностей энергооборудования. М.: АООТ «ВТИ».

А.Ю. Будаева, асп.; рук. Е.Н. Бушуев, д.т.н, доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

О НОРМИРОВАНИИ И КОНТРОЛЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ПГУ

При проектировании систем ведения водно-химического режима (ВХР) котлов-утилизаторов (КУ) ПГУ учитываются требования их заводоизготовителей и нормативных документов [1, 2]. Требуется необходимая и достаточная полнота нормирования химических параметров потоков водного теплоносителя для КУ и пароводяных трактов (ПВТ) ПГУ типовых давлений и типовых схем ПВТ, согласование этих нормативов и методов количественных химических анализов с указанием их метрологических характеристик.

К нормируемым химическим параметрам следует отнести параметры, определяющие интенсивность негативных или позитивных процессов в ПВТ. В качестве примера можно указать на нормирование [2] массовой концентрации хлоридов в питательной (не более 3 мг/дм³) и котловой (не более 1200 мг/дм³ при фосфатировании или обработке гидроксидом натрия) водах КУ. При «аминосодержащем» ВХР массовая концентрация хлоридов в котловой воде КУ не нормируется [3]. Разумным решением является переход к определению хлоридов в котловой воде, хотя и в этом случае надо доказать его необходимость, т.к. экономайзеры и контуры циркуляции КУ сделаны из перлитных сталей.

Нормативное максимальное допустимое значение массовой концентрации натрия в паре барабанного КУ (10 мг/дм³) более, чем в его питательной воде (5 мг/дм³) при обработке питательной воды аминосодержащими веществами указанное в нормативе [2] требует пояснений. Как правило, пар по фактическому качеству не уступает питательной воде.

Таким образом, очевидна целесообразность отступления в ряде случаев от действующих требований (рекомендаций) [2] при разработке карты по ведению ВХР с опорой на результаты теплехимических испытаний и опытно-промышленной эксплуатации. Подтверждение этому получено при обследовании ВХР КУ ПГУ.

Литература

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РД 34.20.501-95.
2. **Водоподготовительные** установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. СТО 70238434.27.100.013-2009. М.: ИНВЭЛ, 2009.
3. **Громов Е.Б.** Исследование влияния октадециламина на эрозионную и коррозионную стойкость конструкционных материалов энергоустановок ТЭС и АЭС: дис. ... канд. техн. наук. Иваново., 2002. 164 с.

*М.В. Бутакова, студ. (НИУ «МЭИ»);
рук. О.В Гусева, к.т.н, нач. отд. водоподготовки (НПФ Траверс)*

РАЗРАБОТКА КОРРЕКЦИОННОГО ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗМЕЕВИКОВЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время на отечественных промышленных предприятиях все большее применение находят змеевиковые парогенераторы (ПГ) низких давлений (ниже 3,8 МПа). Широкому внедрению этих котлов способствовали их преимущества: пар генерируется через несколько минут после включения котла, экономный расход топлива, малые габариты, простота эксплуатации и технического обслуживания.

В змеевиковых парогенераторах нагрев и испарение воды осуществляется за один проход среды по тракту, при этом примеси, поступающие с питательной водой, не могут быть выведены из котла с продувкой. В связи с этим на поверхности труб змеевиковых ПГ вероятно образование труднорастворимых отложений. В зависимости от схем подготовки питательной воды в состав отложений могут входить не только соли жесткости, но и продукты коррозии [1]. Поэтому требования к качеству питательной воды должны быть более жесткими, по сравнению с требованиями для паровых котлов, обеспечивая получение чистого пара и ограничение образования отложений в змеевиках котлов.

Анализ показателей качества питательной и котловой воды ПГ различных производителей показал необходимость организации коррекционного водно-химического режима. Некоторые производители змеевиковых парогенераторов выпускают реагенты для предотвращения накипеобразования, но они не являются универсальными и не могут использоваться на котлах других марок ввиду неизвестного состава и невозможности расчета необходимой дозы. На практике чаще всего используют реагенты, применяемые для барабанных котлов, что делать недопустимо!

С целью определения оптимальных условий минимизации процессов коррозии и накипеобразования, были проведены лабораторные испытания, имитирующие подготовку питательной воды для ПГ. На основании проведенных исследований был разработан коррекционный водно-химический режим для змеевиковых парогенераторов с использованием реагентов марки АМИНАТ [2].

Литература

1. **Акользин П.А.** Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1982.
2. **Маргулова Т.Х.** Применение комплексонов в теплоэнергетике. М.: Энергоиздат, 1973.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

В последние годы в нефтяных компаниях России повышаются затраты на добычу нефти. Это связано с переходом основной группы месторождений на завершающую стадию разработки. Причинами снижения энергоэффективности при добыче нефти являются:

- повышение вязкости нефти, сосредоточенной в мелких порах;
- снижение фильтрационных свойств коллектора при отложении асфальтено-смолопарафинистых веществ (АСПО);

Выбор метода воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) осуществляется преимущественно в виде рекомендаций. Внедрение их методом проб и ошибок связано с большими неоправданными затратами. Очевидно, что прогноз динамики изменения массовых потоков позволяет снизить энергетические затраты и повысить эффективность выбора метода и режима дренирования нефтяных скважин. Это говорит об актуальности решения задач тепломассообмена и оценки энергозатрат при обработке нефтяных скважин.

Преимуществом пульсационного дренирования является возможность эффективной очистки и активизации призабойной зоны пласта. Важным является выбор гидродинамического режима. Математическое моделирование позволяет решить эту задачу путем расчета и анализа массообменных потоков фильтрации и растворения АСПО.

Ф.В. Дяченко, асп.; рук. Т.И. Петрова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМИНОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА 2-го КОНТУРА НА АЭС С ВВЭР

При эксплуатации атомных электростанций в течение длительного времени во 2-м контуре двухконтурных АЭС наиболее широкое распространение имел водно-химический режим (ВХР) с дозированием в питательную воду гидразина и аммиака. В настоящее время достаточно широкое применение получил ВХР с использованием аминов. На зарубежных АЭС для коррекции качества теплоносителя во 2-м контуре 2-контурных АЭС используются следующие основные ВХР: гидразино-аммиачный с рН питательной воды 9.4-9.8; гидразино-аммиачный с рН питательной воды > 9.8; морфолиновый; с дозированием аминов — в основном этаноламина или диметиламина (в смеси с морфолином).

При использовании этаноламина могут возникнуть трудности с эксплуатацией ионообменных фильтров системы очистки продувочной воды СВО-5 и фильтров блочной обессоливающей установки. Это связано с тем, что амины являются органическими соединениями, которые могут загрязнять ионообменные смолы. Результатом загрязнения ионитов органикой может быть снижение обменной емкости, повышение расхода реагентов на регенерацию и воды на отмывку при повторном использовании ионитов. Поэтому были проведены специальные опыты по изучению влияния количества фильтроциклов на изменение обменной емкости катионита КУ-2-8чс в присутствии этаноламина. В качестве исходного раствора использовалась обессоленная вода, содержащая CaCl_2 .

Проведенные исследования показали, что при повторном использовании катионита для обработки воды, содержащей этаноламин, обменная ёмкость исследованного катионита до проскока ионов кальция в фильтрат практически не изменялась и в среднем составляла ≈ 560 г-экв/м³. Сравнение с обменной ёмкостью катионита КУ-2-8чс, полученной при фильтровании только растворов CaCl_2 показывает, что в присутствии этаноламина обменная ёмкость была ниже примерно на 11 %, чем при фильтровании воды, не содержащей этаноламин.

Снижение обменной емкости катионита может быть объяснено как процессом ионного обмена, так и сорбцией молекул этаноламина на ионите. Возможно, что процесс сорбции молекул этаноламина на зернах катионита превалирует.

Таким образом, проведённые исследования показали, что хотя и имеет место некоторое снижение обменной ёмкости катионита КУ-2-8чс в присутствии этаноламина, но оно незначительно скажется на работе системы СВО-5 и конденсатоочистки. Кроме того, обменная ёмкость катионита восстанавливается в процессе регенерации.

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

ВЛИЯНИЕ ТОНИНЫ ПОМОЛА УГЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО СЖИГАНИЯ

Угольная промышленность — одна из ведущих отраслей народного хозяйства Казахстана. В Республике представлены все основные сегменты угольной промышленности, но большее развитие получили добыча и использование энергетического угля. По состоянию на 2013 год, Республика Казахстан занимает седьмое место в мире по объему доказанных запасов угля [1]. В Восточно-Казахстанской области есть месторождение каменного угля марки Д. Уголь добывается открытым способом и очень широко используется. До 2017 г. добычу угля на месторождении Каражыра планируется довести до 10 млн тонн [2].

Потери тепла при сжигании угля зависят от тонины помола, поэтому актуально исследование определения оптимальной тонины помола с целью повышения эффективности использования топлива и получения экономической выгоды при сжигании в котлах различной конструкции.

В проводимом исследовании использовались экспериментальные и теоретические методы по определению потерь теплоты при сжигании угля разреза Каражыра различной тонины помола.

Для нахождения регрессионных уравнений описывающих эффективность процесса сжигания угля использовали планирование эксперимента. Получено оптимальное значение тонины помола.

Проведение многофакторного эксперимента повышает результативность экспериментальных исследований. Полученные результаты могут быть использованы при организации работы котельных установок на данном виде топлива.

Предложения по дальнейшим исследованиям — изучить концентрацию выбросов при различной тонине помола.

Литература

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

2. **Добычу** угля на Каражыра доведут до 10 млн тонн // Казинформ [Электронный ресурс]. URL: <http://kapital.kz/economic/30710/dobychu-uglya-na-karazhyra-dovedut-do-10-mln-tonn.html> (дата обращения: 05.09.2015).

ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ АМИНОВ

Проблемы снижения эффективности и надежности работы энергетического оборудования на современных ТЭС связаны с образованием накипи и отложений на теплопередающих поверхностях оборудования, шлама и коррозии внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов. Эти проблемы обусловлены недостатками применяемых водно-химических режимов (ВХР). На современных ТЭС с ПГУ используются различные виды ВХР: аммиачный, гидразинный, гидразинно-аммиачный, фосфатный и другие. Однако ни один из них не решает проблему защиты от коррозионных процессов в полной мере.

В качестве альтернативы традиционному водно-химическому режиму в настоящее время предлагаются новые реагенты, представляющие собой смесь нейтрализующих и пленкообразующих аминов с различными добавками (полиакрилаты — диспергаторы, скавенджеры — поглотители кислорода и др.). Защитное действие полиаминов основано на формировании адсорбционного слоя на всей поверхности металла, с которой соприкасается среда, содержащая полиамины. Аминосодержащие реагенты типа цетамин [1,2], хеламин [3,4], эпурамин представляют собой комплексные соединения для обработки питательной и котловой воды, способные решать проблемы водно-химического режима.

В работе произведен анализ научно-технической литературы и нормативно-технической документации.

Проведенный анализ позволяет определить возможность ведения водно-химического режима на основе пленкообразующих аминов для условий Уфимской ТЭЦ-2 в качестве альтернативы традиционному водно-химическому режиму.

Литература

1. **Суслов С.Ю.** О выборе реагентов при ведении аминных режимов // Энергетик. 2011. № 1. С. 39—44.
2. **Опыт** ведения водно-химического режима с использованием цетамина на Шатурской ГРЭС (или как загубить идею) / А.В. Кирилина и др. // Энергетик. № 6. 2011.
3. **Суслов С. Ю.** Опыт ведения водно-химического режима с применением хеламина на энергоблоках ПГУ-39 Сочинской ТЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 7. С. 15—21.
4. **Богачёв А.Ф.** Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок // Электрические станции. 2006. № 7. С. 33—36.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ СОРБЕНТОВ

В работе проведен анализ имеющихся на промышленном рынке сорбентов для очистки воды от масла и нефтепродуктов (НП) применительно к условиям Мьянмы [1]. В ходе эксперимента решался вопрос о выборе наиболее дешевого и экологически чистого сорбента. В Мьянме такими сорбентами можно считать отходы сельскохозяйственного производства — рисовую шелуху или кокосовое волокно. Использование аналогичных импортных сорбентов сдерживается их стоимостью.

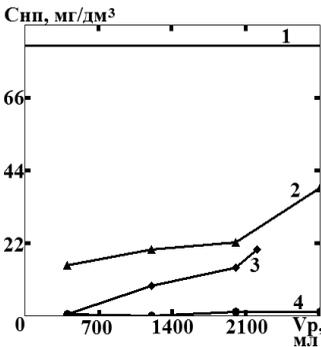


Рис. 1. Изменение концентрации НП в очищенной воде в зависимости от объема пропущенной воды через сорбенты:

1 — исходная концентрация НП; 2 — кокосовое волокно; 3 — рисовая шелуха; 4 — БАУ

На экспериментальной установке кафедры ТЭС проведена работа по сравнению сорбционных свойств рисовой шелухи и кокосового волокна с сорбентом березовый активированный уголь (БАУ), являющимся основным материалом для очистки загрязненных нефтепродуктами вод. Сточная вода после бака мазутного хозяйства ТЭС с концентрацией нефтепродуктов $81,9 \text{ мг/дм}^3$ была пропущена через фильтры, загруженные выбранными сорбентами с высотой слоя 40 см. В очищенной воде проводились измерения содержания нефтепродуктов в зависимости от объема пропущенного раствора. По результатам испытаний построен график, представленный на рис. 1. Динамика графика свидетельствует о том, что сорбенты кокосовое волокно и рисовая шелуха обладают достаточно высокой степенью

очистки, хотя и уступают сорбенту БАУ. Данные сорбенты могут быть рекомендованы в качестве материалов для последней ступени очистки воды, загрязненной нефтепродуктами, на ТЭС и других промышленных предприятиях Мьянмы. Также рисовая шелуха или кокосовое волокно, насыщенные нефтепродуктами (после очистки на них замазученных вод), могут быть использованы как местное топливо.

Литература

1. Климов Е.С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. УЛГТУ, 2011.

Ко Ко Маунг, асп.; А.И. Курченков, В.Г. Поздняков, студенты;
рук-ли И.С. Никитина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
А.Ф. Чабак, Д.А. Чабак, (ЗАО «Академия перспективных технологий»)

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД КАФЕДРЫ ТЭС ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

На ТЭС в настоящее время актуальным является вопрос очистки сточных вод от нефтепродуктов [1-3]. ЗАО «Академия перспективных технологий» предоставило кафедре ТЭС лабораторный стенд (рис. 1) для исследования новых фильтрующих материалов, позволяющих удалять из воды нефтепродукты. Были проведены испытания сорбента «АПТ-8», обладающего сорбирующими и коалесцирующими свойствами [4]. В качестве исходной воды, загрязненной нефтепродуктами, на стенде использовалась водомасляная эмульсия. Использование такой эмульсии позволяет увидеть изменение окраски отработанной части сорбента (переход из белого в желтый цвет). Стенд состоит из трёх секций, выполненных из современного прозрачного материала. Общий объём аппарата 40 литров. Перед подачей на установку водомасляная эмульсия насыщается кислородом. Очистка происходит на сорбенте в первом и втором отсеках, а в третьем отсеке получена очищенная вода. Сорбент АПТ-8 хорошо впитывает нефтепродукты с различной вязкостью и может быть многократно использован. На стенде можно наблюдать очистку воды от нефтепродуктов визуально или калориметрическим методом. Данный стенд может быть использован для обучения студентов, повышения квалификации персонала энергетических объектов, исследования новых фильтрующих материалов.

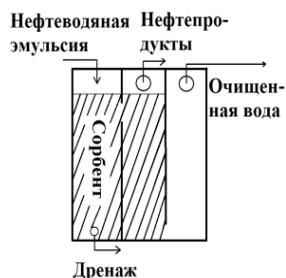


Рис. 1. Схема установки для очистки воды от нефтепродуктов

Литература

1. **Повышение** экологической безопасности ТЭС / А.И. Абрамов, Д.П. Елизаров, А.Н. Ремезов и др. М.: Издательство МЭИ, 2001.
2. **Ксенофонов Б.С.** Очистка воды и почвы флотацией. М.: Новые технологии, 2004.
3. **Рихтер Л.А., Волков Э.П., Покровский В.Н.** Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. М.: Энергоиздат, 1981.
4. [Электронный ресурс]. URL: <http://apt-f.all.biz/> сайт «Академии перспективных технологий».

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

ОБ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОПРОСАХ ВЕДЕНИЯ ХЕЛАМИННОГО ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПАРОВАЗОВЫХ УСТАНОВОК С КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ БАРАБАННОГО ТИПА

В последнее десятилетие в энергетическом сегменте РФ заметна ярко выраженная тенденция: строительство генерирующих мощностей на основе бинарного парогазового цикла. Это обусловлено высоким коэффициентом полезного использования теплоты сгорания топлива ($> 50\%$) наряду с относительно короткими сроками ввода объектов теплогенерации.

Для минимизации условно-постоянных затрат тепловых электростанций целесообразно использовать в качестве единственного кондиционера конденсатно-питательного тракта хеламин, эффективность применения которого экспериментально верифицирована.

Существенным недостатком секвестра традиционного видового состава применяемых корректирующих реагентов на тепловых станциях являются сложности с дозировкой полиаминов необходимой концентрации в котловые воды, основной конденсат и питательную воду. Это связано со значительной инерционностью системы пароводяного тракта, усложняющей поиск «ручными методами» оптимальной корреляции термохимических параметров между насыщенными/перегретыми парами и теплоносителем в барабанах утилизационного экономайзера.

На трудности ведения водно-химического режима ПГУ накладывают отпечаток условия, характерные пассивным элементам тепловой схемы — котел-утилизатор и паровая турбина.

Скользкие параметры работы турбоагрегата создают предпосылки трансформации свойств примесей, потенциально опасных для лопаточного аппарата паровых турбин, — соединений натрия, окислов кремния различной валентности.

Декомпозированный анализ в рамках исследования отразил фазный переход свойств слабых электролитов под влиянием основных факторов:

1. pH среды (волатильность нагрузки — нагружение/разгружение);
2. Скорость пароводяной смеси (состав включенного оборудования);
3. Кратность циркуляции (площадь поверхности теплообмена).

Комплексный подход к решению данных задач лежит в основе метода математического моделирования с учетом конструктивных особенностей строения конвективных поверхностей нагрева и прогнозируемых изменений в технологических процессах.

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТА СОЛЕННОСТИ

Использование энергии смешения пресной и соленой воды является возобновляемым источником энергии, который может быть использован в определенных местах земного шара и обладает потенциалом использования 1600 ТВт·ч/год [1], что составляет примерно одну десятую потребляемой человеком энергии или половину энергопотребления Европы.

Одним из вызовов широкого внедрения осмотических электростанций является несовершенство нынешних мембранных технологий. Предпосылки этой технологии были заложены еще в 1970-е годы Сидни Лоебом [2], но тогда уровень мембранных технологий был слишком низок для реализации электростанции на ее основе. В данный момент мембраны на основе углеродных нанотрубок и графена обладают пропускающей способностью 4 и 10 Вт/м² соответственно [3]. Это позволяет создать способную к выработке значительного количества энергии электростанцию.

В настоящей работе рассмотрены принципы работы осмотической электростанции и проведена оценка их эффективности при различных вариантах схемных решений. Личный вклад автора состоит в компиляции мирового опыта в этой области и изучение возможности применения осмотической электростанции в России.

Литература

1. **Ahmad Naghiloo, Khosro Bakhtari, Majid Abbaspour.** Modeling and Design of a 25 MW Osmotic Power Plant (PRO) on Bahmanshir River of Iran // *Renewable Energy*. 2015. 78. 51–59.
2. **László Panyor.** Renewable Energy from Dilution of Salt Water with Fresh Water: Pressure Retarded Osmosis// *Desalination*. 2012. 199. 408–410.
3. **Sumedh P. Surwade, Sergei N. Smirnov, Ivan V. Vlassioux, Raymond R. Unocic, Gabriel M. Veith, Sheng Dai & Shannon M. Mahurin,** Water Desalination Using Nanoporous Single-layer Graphene// *Nature Nanotechnology*. 2015. 10. 459–464.

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

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ КОНДУКТОМЕТРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГЛУБОКООБЕССОЛЕННОЙ ВОДЫ

Измерение электропроводности воды используется для определения степени минерализации воды и оценки эффективности работы водоподготовительного оборудования в различных лабораториях, в промышленности и энергетике. В работе была изучена взаимосвязь между электропроводностью воды и скоростью потока на кондуктометре. В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния примесей, образующихся в приэлектродном пространстве измерительной ячейки кондуктометра [1].

Вода, поступающая на приборы, была получена на лабораторных установках, которые включают стадию очистки на механических и угольных фильтрах, обратноосмотических мембранах и фильтрах со смешанной ионообменной смолой, что в итоге позволило получить сопротивление воды в диапазоне $17,0 \text{ МОм} \cdot \text{см} \div 18,0 \text{ МОм} \cdot \text{см}$.

Вся вода динамически проходит через звенья установки очистки, далее поступает на экспериментальный стенд с кондуктометрами. Регулировка расхода воды проводилась путем переключения регулировочных вентилей. Экспериментальный стенд состоит из двух кондуктометров и кранов, которые позволяют обеспечить как последовательное, так и параллельное соединение по входному потоку. Измерения проводились на различных расходах при постоянной температуре воды. Калибровка кондуктометров проводилась перед каждым экспериментом и при любом изменении параметров опыта.

В ходе экспериментов было обнаружено снижение удельной электропроводности воды после прохождения кондуктометра, что может свидетельствовать о загрязнении воды примесями, образующимися при протекании приэлектродных процессов. Опытным путем установлен диапазон скорости потока ($0 \div 0,6 \text{ м/с}$), при котором чувствительные элементы кондуктометров оказывают существенное влияние на качество воды. Стоит отметить возможное влияние на результаты эксперимента динамической погрешности измерений, обусловленной изменением условий проведения опытов и инерционными свойствами кондуктометров.

Литература

1. Букатый В.И., Нестерюк П.И. Измерение физико-химических характеристик воды при различных физических воздействиях с учетом переходных процессов // Ползуновский вестник. 2010. № 2.

Ю.Д. Одинцова, студ.; рук-ли С. Ю. Суслов, к.т.н. (ОАО «ВТИ»);
А.Е. Верховский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ РЕАГЕНТОВ НА ИОНООБМЕННЫЕ СМОЛЫ (КАТИОНИТ)

За рубежом проводилось достаточно много исследований, направленных на изучение влияния нейтрализующих аминов на ионообменные смолы. Однако в комплексные реагенты входят не только нейтрализующие, но также и пленкообразующие амины и дисперсанты. Негативное влияние ОДА на ионообменные смолы известно и не оспаривается, поэтому необходимо рассмотреть влияние на смолы пленкообразующих аминов, входящих в состав комплексных реагентов. Также неизвестно влияние дисперсанта, входящего в состав комплексных реагентов.

Проблема влияния аминов на ионообменные смолы актуальна для эксплуатационного персонала тех ТЭС, где есть блочные и автономные обессоливающие установки, а также для проектных организаций, которые разрабатывают такие установки для тепловых электростанций, где используются амины или комплексные реагенты. Особенно остро этот вопрос встает при ведении ВХР с использованием комплексных реагентов, содержащих амины.

В данном докладе проводится оценка влияния комплексных аминоксодержащих реагентов различных марок на работу катионита. В состав некоторых входят только нейтрализующие и пленкообразующие амины, но и дополнительно добавлен дисперсант.

В качестве комплексных аминоксодержащих реагентов были взяты реагенты торговых марок Helamin (хеламин) и Cetamine (последний представляет в работе «семейство» цетаминовых — Cetamine, Purotech, Epuramine). Исследования влияния комплексных реагентов проводились на сильнокислотном катионите DOWEX Monosphere 650 C, КУ-2-8.

*М.М. Пейливанова, Д.В. Кузнецова, студенты;
рук. Ю.А. Морыганова, к.х.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЕВОЙ КИСЛОТЫ

В энергетике для определения концентрации кремниевой кислоты в воде используют колориметрический метод.

Суть колориметрического метода в том, что желтый кремнемолибденовый комплекс $\text{H}_4[\text{Si}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4]\text{xH}_2\text{O}$, образованный за счет взаимодействия соединений кремниевой кислоты с молибденовокислым аммонием, добавленным в избытке, восстанавливается до соединения, окрашенного в синий цвет [1,2]. Восстановленную кремнемолибденовую кислоту невозможно отделить от избытка молибдата, из-за этого нужно подобрать такой восстановитель и такие условия, чтобы восстанавливался только связанный в комплекс малибдат, а не его избыток [3]. В качестве восстановителя можно использовать хлорид олова, щавелевую кислоту, смесь метола с сульфитом натрия, аскорбиновая кислота и т.п.

На станциях чаще всего используют метод, основанный на восстановлении кремнемолибденового комплекса хлоридом олова. После проведения литературного обзора [1—3] был сделан вывод о том, что при использовании сильных восстановителей, таких как хлорид олова, результаты были менее воспроизводимыми и имели завышенные значения.

Для анализа содержания кремния удобно использовать более слабые восстановители, такие как метол, эйкоген, аскорбиновая кислота. При использовании аскорбиновой кислоты опыт следует проводить быстро, так как продукты восстановления неустойчивы на воздухе, и раствор теряет цвет [3].

В литературе [2] была выдвинута гипотеза, что лучшим восстановителем является эйконоген (ЭХТ-кислота), как наиболее мягкий восстановитель. Он представляет собой мелкие белые или серые кристаллы, малорастворимые в воде и спирте. Влияние ЭХТ-кислот на реакцию образования синего комплекса будет являться объектом нашего дальнейшего исследования.

Литература

1. **Бабко А.К., Пилипенко А.Т.** Колориметрический анализ. М.-Л.: ГНТИХЛ, 1951.
2. **Химический анализ** в энергетике. Книга 1: Фотометрия. Книга 2: Титриметрия и гравиметрия / В.Ф. Очков, Ю.А. Морыганова, В.Л. Меньшикова и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. **Мышляева В.Ф., Краснощекоев В.В.** Аналитическая химия кремния. М.: Наука, 1972.

А.П. Процан, С.А. Должиков, студенты; рук. М.В. Ермоленко, к.т.н.
(ГУ им. Шакарима, г. Семей, Казахстан)

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СЕЗОНА РАБОТЫ ТЭЦ

Теплоэнергетика является одним из крупнейших потребителей воды. Для обеспечения бесперебойной работы ТЭЦ и районных котельных необходима тщательная организация водоподготовки. Это объясняется тем, что очень часто вода не соответствует требованиям, так как берется из первичных источников. А низкое качество воды приводит к различным проблемам, среди которых перерасход топлива, снижение коэффициента полезного действия, образование накипи на поверхностях нагрева и др. [1, 2].

Методы и методика исследования. Использованы стандартные методы исследования качества питательной воды, применяемой на ТЭЦ города: определение прозрачности, общей щелочности, общей и кальциевой жесткости, содержания хлоридов и железа, растворенного кислорода, окисляемости, рН.

Результаты исследования. Проведено исследование воды отбираемой из реки Иртыш и воды, отбираемой из городского водопровода. Полученные результаты представлены в виде графиков зависимости исследуемых параметров в различное время года.

Выводы. Показатели качества питательной воды, отбираемой из реки и используемой на ТЭЦ, имеют сезонную зависимость.

Предложения по дальнейшим исследованиям. Необходимо провести анализ различных способов подготовки питательной воды и обосновать целесообразность применения каждого из них в зависимости от типа энергетического предприятия.

Литература

1. **Логунова Н.И., Тутурин Д.Н.** Резервы ресурсосбережения в водном тракте ТЭЦ // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. Материалы III Международной научно-практической конференции.* СПб.: Стратегия будущего, 2013. С. 46—49.
2. **Алексеев С.К.** Контроль качества воды. М.: Академия, 2004. 127 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКАХ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ

Известно, что сложность процессов, протекающих в пароводяном тракте энергетического блока, приводит к значительным трудностям теоретических обобщений. Поэтому основой практических расчетов и теоретических обобщений является эксперимент [1]. На кафедре технологии воды и топлива НИУ «МЭИ» для проведения экспериментов при высоких параметрах разработана установка, которая относится к числу установок высоких параметров. Установка позволяет имитировать пароводяной тракт энергоблока тепловой электростанции при давлениях до 24 МПа и температурах до 600°C. Однако ее использование требует особых мер предосторожности в части исключения влияния внешних факторов на качество теплоносителя и результат эксперимента.

Актуальность данного исследования вызвана востребованностью опытных и расчетных данных по влиянию внешних факторов на результаты эксперимента.

Целью исследования является изучение факторов, влияющих на качество теплоносителя, и оценка их влияния на проведение эксперимента. Влияние могут оказывать следующие факторы:

- методы получения требуемых параметров теплоносителя;
- исходное качество рабочего тела, подаваемого на установку;
- загрязнение теплоносителя за счет случайных примесей, особенно за счет взаимодействия теплоносителя со стенками поверхностей нагрева;
- система пробоотбора воды и пара, оказывающая влияние на представительность пробы.

Для получения высокой температуры в данной установке используется метод прямого нагрева стенок трубок электрическим током высокой силы. Была предпринята попытка определения влияния данного метода на физико-химические характеристики теплоносителя и, как следствие, на результат эксперимента.

Систематизация и обобщение факторов, их влияние на проведение экспериментов позволит получать более точные результаты экспериментов.

Литература

1. **Стырикович М.А., Резников М.И.** Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. М: Энергия, 1977.

*М.М. Сазанова, К.Е. Кузина, студенты;
рук. О.В. Егошина, к.т.н, доц. (НИУ «МЭИ»)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИАМИНОВ

Органические добавки в теплоноситель на ТЭС и АЭС используются с целью сокращения образования отложений в котле и снижения скорости коррозии конструкционных материалов энергетического оборудования. Наибольшее применение данные добавки нашли при ведении водного режима во втором контуре АЭС с водо-водяными реакторами. В последние годы появились комплексные реагенты на основе органических соединений, направленные на поддержание оптимального водного режима ТЭС [1]. Использование комплексных реагентов на ТЭС предполагает количественное определение массовой концентрации полиаминов в пароводяном тракте энергоблока. К наиболее распространенным методикам на сегодняшний день следует отнести определение с помощью фотоколориметрического метода с индикаторами — эозином Н (ЭОЗ), бенгальским розовым (БР) или бенгальским красным (БК), способными обнаруживать содержание полиаминов в концентрации менее 100 мкг/л, характерной для штатного дозирования реагента [2].

Сущность данных методик заключается в одном и том же: измерении оптической плотности окрашенного соединения, образующегося при взаимодействии полиамина, входящего в состав ряда реагентов, в кислой среде в диапазоне рН 2,3—3,3 при длине волны 540—565 нм [3].

Эозин является более чувствительным реагентом на аминогруппу. Эта методика позволяет обнаружить концентрацию полиамина в диапазоне от 3 до 400 мкг/л на кюветах длиной 50 мм, что дает ошибку результата не более 15%. Но сложность технологии приготовления реактивов и длительное время реакции дает существенное преимущество методикам с БР и БК. Ошибка определения с их использованием в диапазоне концентраций 10-1000 мкг/л не превышает 15 % для БР и 20 % — для БК. Минимально определяемая концентрация на кюветах длиной 50 мм составляет 5 мкг/л для БР и 10 мкг/л — для БК.

Литература

1. **Федосеев Б. С.** Опыт эксплуатации барабанных котлов на эпураминном водно-химическом режиме // Энергетик. 2007. № 11. С. 12—15.
2. **Сулов С.Ю.** О выборе реагентов при ведении аминных режимов // Энергетик. 2011. № 1. С. 39—44.
3. **Обзор** и сравнение аналитических методик на определение содержания полиаминов в котловых водах и конденсатах ТЭС / И.А. Сергеев и др. // IV Международная научно-техническая конференция «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи». 2013. С. 45—54.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОктаДЕЦИЛАМИНА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНСЕРВАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Известно, что при длительных простоях (более семи суток) оборудования ТЭС возникает необходимость защиты деталей энергетического оборудования от коррозии в период нахождения их в ремонте или резерве.

При консервации летучими ингибиторами на поверхности металла образуется тонкая защитная пленка ингибитора за счет продувки подогретого ингибированного воздуха. При этом ингибитор адсорбируется, а внутри оборудования создается защитная пленка. В последние годы для очистки и образования консервирующей пленки на проточной части различного оборудования и турбин рекомендуется пленкообразующий реагент — октадециламин.

При консервации октадециламином энергетического оборудования необходимо контролировать концентрацию октадециламина в рабочей среде. Для контроля бесконтактным способом была разработана методика определения концентрации ОДА прибором КРТ в присутствии различных органических кислот. На рис. 1. представлена зависимость удельной электропроводности от концентрации ОДА в присутствии различных органических кислот.

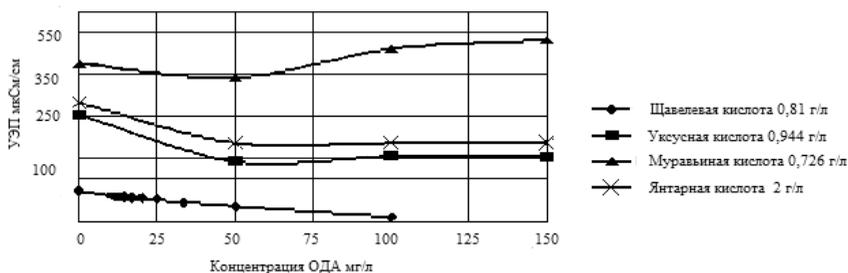


Рис. 1. Влияние $C_{\text{ОДА}}$ на УЭП в присутствии различных кислот

Из представленных данных следует, что в присутствии щавелевой кислоты показания прибора КРТ устойчивы.

Литература

1. Бухаров Д.Г., Зонов А.А., Шавыкин А.В. Промышленный бесконтактный кондуктометр ИТ-2201 для контроля электрической проводимости теплоносителя // Новое в Российской электроэнергетике. 2008. № 12. С. 33.

Е.А. Селиванов, студ.; рук. Т.И. Петрова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

В настоящее время совершенствование энергетического оборудования направлено на повышение экономичности работы ТЭС. Одним из таких способов является повышение начальных параметров. Так, во второй половине двадцатого века были введены в эксплуатацию блоки на сверхкритических параметрах: 560 °С и 23,5 МПа [1]. В настоящее время имеется тенденция к переходу к более высоким параметрам — повышение температуры до 700 °С, давления до 30 МПа [2]. Поэтому встает вопрос о том, какие конструкционные материалы могут быть использованы. Известно, что стали, применяемые на блоках сверхкритических параметров, образуют защитную пленку из магнетита только до 570 °С [3].

Таковыми материалами могут быть сплавы на основе никеля или хрома. В работе проведен обзор исследований для сталей Т22, Т304Н, НСМ12А, Т91, NF616 и др. при температуре пара 670 °С и давлении 26.7 МПа [4]. По результатам обзора дано сравнение исследуемых конструкционных материалов по таким показателям, как скорость коррозии, толщина и состав оксидных пленок в зависимости от концентрации кислорода. Приведено сравнение различных конструкционных материалов по типам коррозионных повреждений.

Анализ данных показывает, что при прочих равных условиях сплавы на основе никеля обладают лучшими коррозионными свойствами по сравнению с углеродистой и нержавеющей сталями, но они подвержены коррозии под напряжением и питтинговой коррозии.

Литература

1. **The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power Systems** Editor-in Chief Paul Cohen, EPRI, 1989.
2. **Gabrielly F., Schwevers H.** Design Factors and Water Chemistry Practices – Supercritical Power Cycles. Int.Conf., PREPRINT- ICPWSXV (Berlin, September 8-11, 2008).
3. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
4. **Holcomb G.** High Pressure Steam Oxidation of Alloys for Advanced Ultra-Supercritical Conditions. Oxid. Met. 2014, P. 271—295.

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ТЭС

Хорошо известно, что надежность работы энергетического оборудования складывается из следующих факторов: организации водно-химического режима, наличия систем химико-технологического мониторинга, наличия автоматических систем дозирования реагентов, наличия отложений и ряда других факторов [1].

Целью данной работы является оценка влияния теплофизических и химических параметров теплоносителя на надежность работы оборудования парогазовых установок ТЭС.

Актуальность данной работы вызвана востребованностью опытных и расчетных данных по влиянию теплофизических и химических параметров теплоносителя на надежность энергетического оборудования, недооцененная роль водно-химического режима и систем химико-технологического мониторинга, что ведет к ухудшению качества теплоносителя и отсутствию на некоторых станциях автоматических систем дозирования реагентов.

На основании данных автоматического, лабораторного химического и теплотехнического контроля блоков ПГУ ТП «Мосэнерго» был проведен расчет повреждаемости энергетического оборудования по формулам (1) и (2):

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

$$ИПО = ЭНЧ \times ХИ / ТИ, \quad (2)$$

где число 54,43 — максимальное значение индекса повреждаемости (ИПО); ХИ — химический индекс; ТИ — теплотехнический индекс; ЭНЧ — эквивалентная наработка.

Результаты данного исследования помогут понять степень совместного влияния водно-химического режима и теплоэнергетических факторов на надежность работы оборудования, степень влияния СХТМ на качество ведения ВХР, а следовательно, на надежность работы оборудования.

Литература

1. Паули В.К. Технология воды и надежность: Курс лекций. М.: Издательство МЭИ, 2000.

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

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ПРИМЕСЕЙ ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Надежность, экономичность и безопасность работы энергоблоков ТЭС в значительной степени зависит от состояния водно-химического режима (ВХР), регулируемого правилами технической эксплуатации [1] и другими нормативными документами. Нарушения ВХР должны отслеживаться непрерывно приборами автоматического химического контроля (АХК) по всему пароводяному тракту энергоблока.

В связи с повышением требований к качеству водного теплоносителя и ужесточению норм необходимо совершенствовать СХТМ на базе существующих приборов АХК. Расширение диагностических возможностей этих приборов обеспечивается применением математических моделей и алгоритмов расчета качества воды и пара с применением ЭВМ. Появление на рынке высокотехнологичных приборов дает возможность измерения и расчета нескольких показателей качества при уменьшении количества устанавливаемых приборов. Это обусловлено наличием нескольких каналов ввода и вывода информации на одном приборе.

Сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ совместно с «НПП Техноприбор» (г. Москва) разработан автоматический анализатор примесей водного теплоносителя на базе многоканального прибора «Лидер». Это устройство для контроля качества воды и пара позволяет по двум измеренным показателям (χ , χ_H) рассчитать и вывести на экран показатели:

- при аммиачном ВХР: хлориды, рН, аммиак и натрий условный;
- при безаммиачном ВХР: хлориды, рН и натрий условный.

Данный прибор может устанавливаться практически на любой энергоблок, он позволяет измерить и рассчитать практически все требуемые характеристики качества питательной воды. Установка прибора на конденсат турбины может позволить диагностировать присосы охлаждающей воды в конденсаторе.

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

Литература

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

ВЫБОР СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ИСТОЩЕНИЯ ИОНИТА НА-КАТИОНИТНОГО ФИЛЬТРА

На тепловых электростанциях лабораторный контроль за работой На-катионитного фильтра ведется по общей жесткости фильтрата. Фильтр считается сработавшимся, как только значение общей жесткости превысит максимально допустимое значение. Однако расчетная остаточная жесткость фильтрата как критерий истощения является ненадежным показателем. Поэтому в данной работе предлагается иной способ определения момента истощения ионита, а именно по превышению изменения концентрации ионов натрия над предельно допустимым значением.

В лаборатории кафедры ТЭС был проведен эксперимент по выявлению наилучшего способа определения момента истощения ионита.

Первый способ заключался в определении общей жесткости в фильтрате (1) и сравнении с предельным значением общей жесткости первой ступени На-катионирования в фильтрате, которое составляет 0,1 мг-экв/л [1]:

$$Ж_0^{\text{умяг}} = Ж_0^{\text{осв}} - \frac{\Delta[\text{Na}^+]}{\Theta_{\text{Na}}} = 2,9 - \frac{66,2}{23} = 0,022 \text{ мг-экв/л}, \quad (1)$$

где $\Delta[\text{Na}^+] = [\text{Na}^+]_{\text{умяг}} - [\text{Na}^+]_{\text{осв}} = 73,18 - 6,98 = 66,2 \text{ мг/л}. \quad (2)$

Второй способ определения момента истощения ионита заключался в сравнении изменения величины концентрации натрия с предельно допустимым значением (67—89 мг/л) [1]:

$$\Delta[\text{Na}^+] = [\text{Na}^+]_{\text{умяг}} - [\text{Na}^+]_{\text{осв}} = 73,18 - 6,98 = 66,2 \text{ мг/л}. \quad (3)$$

Значения общей жесткости и концентрации натрия в обоих случаях не превышают максимально допустимых значений. Можно сделать вывод, что ионит не истощен.

В результате проведенной работы показано, что способ по превышению изменения концентрации ионов натрия над предельно допустимым значением является более надежным, так как измерение концентрации натрия с помощью автоматического анализатора имеет меньшую погрешность по сравнению с определением жесткости объемным методом. Кроме того, согласно ряду селективности, проскок ионов натрия происходит раньше, чем проскок ионов жесткости.

Литература

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

*Е.А. Ульянова, студ.; рук-ли Ю.А. Морыганова, к.т.н., доц.;
К.А. Орлов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ pH СРЕДЫ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИАМИНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕНГАЛЬСКОГО РОЗОВОГО

На сегодняшний день наибольший интерес представляют спектрофотометрические методы определения алифатических аминов, основанные на образовании алифатическими аминами окрашенных соединений с производными флуоресцеина — это эозин, бенгальский розовый, бенгальский красный. Эозин является более чувствительным реагентом на аминогруппу. Но предлагаемая и запатентованная на сегодняшний день методика имеет один недостаток — длительное время реакции (около 35 минут), что является не совсем удобным для применения этой методики на станции, где время эксперимента ограничено. Реакция с бенгальским розовым и бенгальским красным идет гораздо быстрее — 5—7 минут.

В 2010 г. в США был опубликован патент, предлагающий использование бенгальского розового в качестве реактива для определения полиаминов при значении $\text{pH}=4$ в среде уксусной кислоты[1]. Позднее в 2012 «ВТИ» предложил такую же методику, только в среде ледяной уксусной кислоты с pH среды 2. В работе проведены исследования влияния pH среды на чувствительность бенгальского розового на циклогексиламин, как один из компонентов практических всех полиаминных композиций. Опыт проводился при концентрациях 4,7 и 10 мкг/л. Опыт показал, что при $\text{pH} = 2$ $r = 0,95$ (коэффициент корреляции), а при $\text{pH} = 4$ $r = 0,97$. Из этого можно сделать вывод, что кислотность среды в данном случае не влияет на взаимодействие индикатора и ЦГА. Проводился также опыт при меньших концентрациях (0,5;1,2 мкг/л), но построить калибровочную кривую не удалось. Это объясняется нечувствительностью индикатора к малым концентрациям ЦГА.

Литература

1. **Faborga S.A, Graf Anton, Gachnang Hans Rudolf.** Method for the Determination of Polyamines. European Patent Office. 2010.

Е.Г. Ухалова, соиск.; рук. А.Б. Ларин, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

УТИЛИЗАЦИЯ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ ВОД УСТАНОВОК ХИМИЧЕСКОГО ОБЕССОЛИВАНИЯ ДОБАВОЧНОЙ ВОДЫ НА ТЭС

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

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

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

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

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

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

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

Литература

1. **Правила** охраны поверхностных вод (типовые положения). М.: Государственный комитет СССР по охране природы. 1991.

2. **Стратегия** защиты водоемов от сброса сточных вод ТЭС ОАО «Мосэнерго» / Н.И. Серебрянников, Г.В. Преснов, А.М. Храмчихин и др. // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 2—6.

А.М. Шамигулова, студ.; В.В. Косулин, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Снижение энергоэффективности в сетях тепло- и водоснабжения вызывается тем, что не проводится химводоподготовка на должном уровне. Для управления технологическими процессами водоподготовки требуются непрерывно действующие автоматические приборы химического контроля, информирующие о качественных показателях технологического процесса (жесткость, рН, содержание солей). Трансформаторные кондуктометры как частный случай бесконтактных индуктивных кондуктометров обычно не рассматриваются в литературе.

Разрабатываемый прибор относится к области кондуктометрии и предназначен для измерения электропроводности электролитов в непрерывном потоке. Он может быть использован при физико-химических исследованиях растворов в лабораторных условиях, а также в качестве первичного преобразователя с выходным сигналом по напряжению в измерительных комплексах непрерывного контроля над режимом работы установок химводоподготовки ТЭЦ.

В рамках выполнения магистерской диссертации была собрана экспериментальная установка — бесконтактный двухканальный кондуктометрический преобразователь для непрерывного контроля качества воды. Были спланированы и проведены эксперименты по измерению величины выходного сигнала в зависимости от природы исследуемого электролита, его концентрации и частоты питающей сети.

На основе стандартной методики, описанной в [2], была проведена обработка результатов измерений. Для нахождения по результатам эксперимента связи выходной характеристики процесса с факторами, которые влияют на эту характеристику, использовался регрессионный анализ. После этого при помощи метода наименьших квадратов было подобрано уравнение регрессии. Затем при помощи метода Гаусса были найдены коэффициенты уравнения регрессии.

Установлено, что искомое уравнение регрессии — это полином 3-й степени. Влияющий фактор — частота питающей сети.

Литература

1. Патент № 2519495. РФ. МПК G01N 27/06 Способ измерения электропроводности раствора электролита / В.И. Савинов, В.К. Ильин, О.В. Ильин. — Оpubл. 10.06.2014. Бюл. № 16. 13 с.

2. Косулин В.В. Основы информационных и измерительных технологий: учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. 291 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНОВКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА

Получение деминерализованной воды на установках обратного осмоса (УОО) находит широкое применение во многих отраслях промышленности, включая энергетику, нефтехимическое производство, медицину. Применение данного метода позволяет решить задачу получения очищенной воды высокого качества. Одним из ключевых составляющих в такой установке является мембранный элемент (МЭ). Исходная вода, проходя через него под высоким давлением, делится на концентрированный сток и фильтрат (пермеат) [1,2]. Считается, что все однотипные МЭ имеют схожие между собой технические характеристики. Однако при проектировании УОО следует учитывать, что это не так. Поэтому определение исходной компоновки мембранных элементов и замена их в процессе работы требует применения оптимальных схем установки мембран в корпус и качественного подбора аналогов для мембран, отработавших свой ресурс. Особенно это актуально для крупных промышленных установок (производительность от 30 м³/ч и более), в процессе работы которых требуется обеспечить стабильную работу оборудования и эффективность очистки.

По результатам проведения испытаний и тестирования МЭ на пилотной установке обратного осмоса был разработан ряд мероприятий с определением основных данных, которые позволяют оптимизировать процесс выполнения качественного монтажа и замены МЭ. Результаты тестовых испытаний позволяют определить индивидуальные характеристики для любого МЭ при различных режимах работы, помогают спрогнозировать поведение оборудования при изменении начальных эксплуатационных параметров. Следует отметить, что на основе полученных данных можно обеспечить необходимую симметрию работы УОО, оптимизировать выходные характеристики, минимизировать потери рабочего давления и производительности, увеличение ее эффективности.

Литература

1. **Мембранные** технологии в промышленной водоподготовке / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий и др. М.: ДеЛи плюс, 2012.
2. **Рябчиков Б.Е.** Современная водоподготовка. М.: ДеЛи плюс, 2013.

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

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЕДЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Оператору современной тепловой электростанции при контроле водно-химического режима приходится иметь дело с большим количеством показателей качества теплоносителя в различных точках пароводяного тракта. Для повышения информативности современных систем химико-технологического мониторинга в работе предлагаются алгоритмы расчета *индексов качества*, суть которых заключается в сравнении значений контролируемых параметров с их нормируемыми значениями, что позволяет выявлять наиболее опасные тенденции на данный момент времени и определить первоочередные задачи для оперативного персонала.

В основу расчета индекса качества заложен алгоритм, согласно которому чем больше значение индекса качества, тем значительнее нарушение водно-химического режима. Если значение текущего параметра находится в пределах установленных норм, то значение индекса качества изменяется от нуля до единицы. Значение индекса качества, равное единице, является граничным между нормальным уровнем контролируемого параметра и нарушением.

С точки зрения оптимизации водно-химического режима необходимо оценивать состояние водно-химического режима отдельных участков тракта и всего энергоблока. В работе [1] индексы качества участка тракта рассчитываются как среднее арифметическое значение индексов качества контролируемых параметров. Такой подход не позволяет выявить нарушения водно-химического режима на раннем этапе, когда превышения норм незначительны. В данной работе предложен иной алгоритм расчета общего индекса качества. Если значение какого-либо из контролируемых параметров выйдет за пределы установленных норм, то значение общего индекса качества превысит единицу.

Разработанный алгоритм предоставляет объективную информацию о состоянии водно-химического режима и позволяет оперативно выявлять нарушения. Предлагаемый алгоритм информативен, доступен для оператора, универсален, что позволяет применять его для оценки качества водно-химического режима энергоблоков на органическом топливе с паросиловыми или парогазовыми установками.

Литература

1. **Сметанин Д.С.** Разработка и использование технологических алгоритмов в системах химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электрических станций. Дис. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2005.

Секция 45

СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

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

Секретарь секции — аспирант Д.А. Ковалёв

Д.В. Алмазкин, студ.; рук. А.А. Дудолин, к.т.н., доц., (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКА ПГУ-220Т

Одним из направлений развития энергетики является широкое внедрение комбинированных парогазовых установок. Уже сейчас КПД таких установок может достигать свыше 60 процентов [1]. Это позволяет не только экономить топливо, но и улучшить экологическую обстановку. Важным преимуществом ПГУ является высокая маневренность [2], однако даже поверхностный анализ показывает, что при частичных нагрузках условия работы и экономичность отдельных элементов (ГТУ, КУ, ПТУ) могут изменяться так, что работа ПГУ станет невозможной и нерентабельной. Также стоит отметить, что глубина исследований этих технологий не велика ввиду того, что для российской энергетики они являются относительно новыми, и опыт покрытия ПГУ графиков нагрузки невелик.

Объектом исследования в данной работе является энергоблок ПГУ-220Т (табл.1). Расчеты и составление математической модели для исследований проводились в программном комплексе Thermoflow. Используя разработанную модель, были проведены исследования по влиянию температура наружного воздуха, нагрузки ГТУ и других параметров на показатели тепловой экономичности, составлены режимные зависимости, проведена оптимизация работы ПГУ совместно с турбоагрегатами ТЭЦ-12 (Мосэнерго), а также оптимизация начальных параметров и схемы включения теплофикационной установки. Результаты расчета номинального режима блока ПГУ-220Т приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета номинального режима блока ПГУ-220Т

Параметр	Значение
Электрическая мощность ПГУ(при $-3,1^{\circ}\text{C}$)	227 МВт
Электрическая мощность ПТУ	168,1 МВт
Электрическая мощность ПГУ	58,9 МВт
Мощность теплофикационной установки	153,3 Гкал/ч
КПД эл.	0,7278
КИТ	0,8171

Полученные результаты можно использовать как для увеличения экономичности ПГУ-220Т, так и в целом для дальнейшего более глубокого изучения процессов происходящих при переменных режимах работы ПГУ.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций М.: Издательство МЭИ, 2002. 584 с., ил.
2. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 647 с.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ КАЗАХСТАНА

Единая электроэнергетическая система Казахстана работает параллельно с ЕЭС России и объединенной энергетической системой Центральной Азии. ЕЭС Казахстана условно разделена на три зоны: северная, южная и западная [1]. На рис. 1 изображен график производства-потребления электроэнергии по зонам Республики Казахстан за 1 полугодие 2015 года:

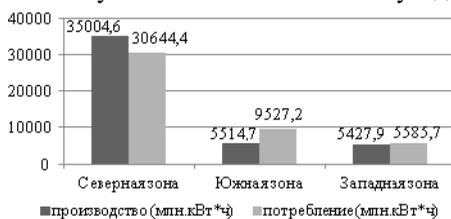


Рис.1. Производство-потребление электроэнергии по зонам ЕЭС за первое полугодие 2015 года [2]

По итогам 1 полугодия 2015 года производство электрической энергии по типам станции выглядит следующим образом: ТЭС — 82 %; ГТЭС — 8 %; ГЭС — 10 % всей производимой в Казахстане электроэнергии [2].

В Казахстане до 2030 г. планируется:

- запустить тепловые и газотурбинные электростанции общей установленной мощностью 6800 МВт;
- запустить в районе Курчатова в 2023 году первую в Казахстане промышленную АЭС. Компания Казатомпром и Росатом подписали меморандум о совместном строительстве двух блоков АЭС с использованием реакторов нового поколения. Мощность каждого энергоблока планируется от 600 до 1200 МВт [1];
- в связи с дефицитом пресной воды в г. Актау, МАЭК в 2015 г. запускает две новые опреснительные установки производительностью 12 тысяч кубов в сутки каждая.

Таким образом, можно сделать вывод, что энергетика Казахстана развивается по тем же стратегическим направлениям, что и энергетика России. Это дает возможность этим двум странам активно сотрудничать на взаимовыгодной основе в области энергетики и энергетического машиностроения.

Литература

1. Журнал РБК, 2014.

М.Р. Багаутдинова, студ.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТУРБИН Т-110/120-130 ЗАО «УТЗ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

На сегодняшний день наиболее распространенные в стране теплофикационные турбины типа Т-110/120-130, в значительной степени выработали свой ресурс и подлежат замене. Анализ эксплуатации их в условиях рынка, показал, что они не конкурентоспособны при работе в конденсационном режиме. К этому следует добавить, что за счет внедрения энергосберегающих технологий наблюдается устойчивое снижение потребления тепла на отопление и ГВС. Все это приводит к сокращению времени их использования на тепловом потреблении и снижению эффективности.

В данной работе приводятся результаты исследований реконструкции турбин типа Т-110/120-130 с использованием, промперегрева. Использование промперегрева позволяет повысить КПД по выработке электроэнергии данных турбин до 38—39 % и повысить конкурентоспособность оборудования. Вместе с тем, исследования показали, что наиболее целесообразна реконструкция с сохранением мощности на уровне 110 МВт при сокращении расхода пара в голову турбины, при работе на тепловом потреблении до 400 т/ч по сравнению с решением, предложенным заводом, изготовителем [1].

В этом случае вся остальная инфраструктура станции (система выдачи мощности, электрическая часть и т.д.) остается без изменений и не требует одновременной замены.

Большинство турбин типа Т-100 укомплектованы котлами производительностью 480—500 т/ч. Реконструкция таких котлов с использованием промперегрева проводится с минимальными затратами, за счет замены части поверхностей нагрева.

В результате такой реконструкции увеличивается не только экономичность работы турбины в конденсационном режиме, но, что более эффективно, увеличивается продолжительность работы на тепловом потреблении и вырастает выработка электроэнергии на тепловом потреблении с 0,57 до 0,73 МВт/Гкал.

В результате такая реконструкция турбины оказывается более эффективной, чем простая замена.

Литература

1. **Баринберг Г.Д., Валамин А.Е.** Теплофикационные паровые турбины Т-130/130-12,8 с промежуточным перегревом пара // Теплоэнергетика. 2008. № 8.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЭЦ ПУТЕМ ПЕРЕВОДА ТУРБОАГРЕГАТА В РЕЖИМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ

Одной из важных задач энергетики в настоящее время является повышение эффективности использования топливного ресурса на электростанциях. Для ТЭЦ повышение экономичности станций связана с уменьшением потерь тепловой энергии в конденсаторах ТА.

Одно из решений связано с уменьшением вентиляционного пропуска пара в ЧНД и, соответственно, переводом агрегата в режим противодавления.

В данной работе проводится анализ эффективности использования таких режимов. Следует учесть, что перевод в режим противодавления, позволяет увеличить отпуск пара из отборов данной турбины на величину вентиляционного пропуска (для турбины Т-100-130) увеличивается на 7—10 Гкал [1]. Так как тепловая нагрузка ТЭЦ в целом остается постоянной, то это приводит к снижению выработки электрической энергии на тепловом потреблении на других турбинах.

Кроме этого, перевод в режим противодавления приводит к тому, что электрическая мощность данной турбины полностью определяется тепловой нагрузкой и параметрами. В результате в процессе эксплуатации могут возникать ограничения располагаемой мощности, что может привести как к снижению оплаты мощности по месяцам года, так и возникновению штрафных санкций.

С учетом перечисленных выше факторов была проведена оценка экономической эффективности перевода. В качестве критерия принимался маржинальный доход в течение года, полученный на станции. Для расчетных исследований были использованы следующие исходные данные: средняя цена топлива 3900 руб/т.у.т средняя цена на рынке электроэнергии 1150 руб/(МВт·ч), плата за мощность 100 тыс. руб/МВт в месяц. Результаты расчетов показали, что экономия топлива может достигать для турбины Т-100-130 до 10 000 т.у.т при использовании ее в течение года 7500 часов.

Однако если в течение неотапительного периода возникнет ограничение мощности около 4 % $N_{\text{НОМ}}$, то даже без учета штрафных санкций, перевод в режим противодавления не принесет экономического эффекта.

Литература

1. Печенкин С.П., Серебрянников В.Н., Тишин С.Г. Расчет на ЭВМ тепловых схем паротурбинных установок ТЭС и АЭС. / Под ред. С.Г. Тишина. М.: Изд-во МЭИ, 1992.

Д.А. Денищук, студ.; рук. Д.В. Горбуров, к.т.н., ст. преп.; (НИУ «МЭИ»)

СИСТЕМА ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Необходимость удерживать высокую температуру уходящих газов пылеугольных котлов (порядка 140 °С) вызвана наличием сернистой коррозии хвостовых поверхностей нагрева котла. Избежать конденсации паров SO₃ возможно только при поддержании температуры уходящих газов выше, чем температура точки росы серной кислоты. В свою очередь, повышение температуры уходящих газов влечет за собой повышение потерь в окружающую среду, снижение КПД котла и термического КПД всего цикла [1].

Принцип работы установки глубокой утилизации теплоты с конденсатором уходящих газов (КУГ) основан на понижении температуры уходящих газов ниже точки росы серной кислоты в специальном поверхностном теплообменнике — КУГ, поверхности нагрева которого защищены от действия серной кислоты специальным покрытием. Температура газов на выходе из КУГ обусловлена условиями рассеивания газов при неизменной высоте дымовой трубы и составляют порядка 80—90 °С, в зависимости от параметров блока. Охлаждающей средой в КУГ является основной конденсат. В тепловую схему КУГ включается параллельно подогревателям низкого давления ПНД1 и ПНД2, так, чтобы часть основного конденсата проходила через них, а часть через КУГ, обеспечивая необходимый теплосъем. Сконденсировавшиеся пары SO₃ (порядка 4—5 % от общего объема паров оксидов серы [1]) вместе со сконденсировавшимися парами воды собираются в конденсаторосборнике. Полученный слабый раствор серной кислоты направляется в баки-отстойники, для последующей утилизации.

Исследование экономического эффекта данной технологии было проведено для паротурбинного блока мощностью 225 МВт проектируемой ТЭЦ-2 города Артем, Приморского края. Основное топливо — бурый уголь. При снижении температуры газов от 138 °С до 85 °С в КУГ абсолютный прирост КПД (брутто) блока составил 1,191 %, абсолютный прирост КПД (брутто) котла — 2,681 %, а экономия натурального топлива — 41076 т/год. Данная технология позволяет повысить технико-экономические показатели блока без замены основного и вспомогательного оборудования.

Литература

1. Магадаев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1986.

*Ю.А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, соиск.; рук. Н.Б. Карницкий,
д.т.н., проф. (БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)*

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Одной из главных задач экономики в энергетике является постоянное и непрерывное повышение энергоэффективности, в первую очередь — на действующих и строящихся ТЭС и АЭС.

Рассматриваются проблемы эксплуатации конденсаторов паровых турбин и оросительных и водораспределительных систем башенных градирен. Отмечено, что из этих устройств в атмосферу выбрасывается до 60% теплоты, полученной в результате сжигания топлива на электростанциях [1]. Проанализированы методы очистки от отложений конденсаторов, конструкции применяемых тепло-массообменных устройств градирен, их недостатки и влияние на охлаждающую способность. Показаны не только пути решения вышеуказанных проблем, но и представлены материалы, в том числе экспериментальные, по удачной их реализации. Приведены методики расчета экономической эффективности оценки работы автоматической системы шариковой очистки (АСШО) конденсатора турбины и оросительной и водораспределительной системы башенной градирни. Важно, что эти методики могут быть реализованы на многих подобных объектах, так как они обладают в определенной степени универсальностью. Приведены результаты расчетов, свидетельствующих об эффективности АСШО и градирен с полимерным оросителем [2].

Необходимо отметить, что приведенные энергоэффективные технологии в системах технического водоснабжения также увеличивают располагаемую электрическую мощность ТЭС, и могут быть распространены на тепловые и атомные электростанции Белорусской энергосистемы и ближнего зарубежья.

Литература

1. **Мошкарин А.В.** Современные основы технического перевооружения тепловых электростанций. // Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 2.
2. **Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю.А.** Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ. Часть 1 и 2 // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2015. № 3 и № 4.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТНУ

Использование теплового насоса в схеме ГТУ позволяет добиться повышения экономичности. Посредством передачи тепловой энергии от воздуха через промежуточный теплоноситель происходит предварительный подогрев топлива, что положительно влияет на эффективность работы установки. Решается проблема зависимости параметров работы ГТУ от температуры атмосферного воздуха в теплое время года, так как воздух охлаждается в испарительном теплообменнике ТНУ. Это влечет за собой уменьшение потребляемой мощности воздушного компрессора, так как более холодный воздух имеет большую плотность [1].

Автором рассмотрена схема ГТУ с замкнутым контуром охлаждения (рис. 1), который позволяет дополнительно подогреть топливо, используя промежуточный теплоноситель для передачи тепла масла узлов трения ГТУ.

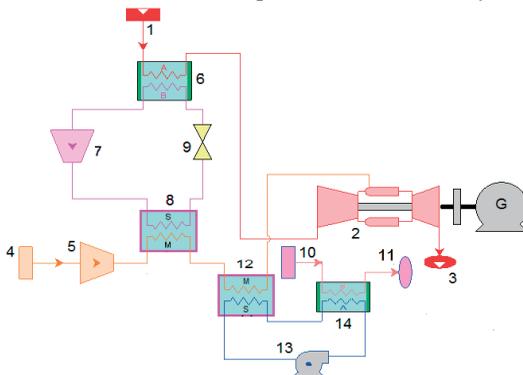


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ с ТНУ:

1 — устройство воздухподготовки; 2 — ГТУ; 3 — тракт уходящих газов; 4 — устройство топливоподачи; 5 — дожимной компрессор; 6 — испарительный теплообменник; 7 — устройство повышения давления; 8 — конденсаторный теплообменник; 9 — устройство понижения давления; 10, 11 — маслосистема ГТУ; 12 — теплообменник подогрева топлива; 13 — устройство повышения давления; 14 — теплообменник охлаждения масла.

Таблица 1

Сравнение показателей экономичности схем ГТУ

Показатель экономичности	ГТУ	ГТУ с ТНУ
Электрическая мощность, МВт	27,7	30,1
КПД брутто, %	35,5	37,1

Литература

1. Дудолин А.А., Буров В.Д, Сойко Г.В. Газотурбинная установка с тепловым насосом. Патент на изобретение, заявка № 2012145927/06, 2014.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА ОПТИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОФИКАЦИИ

Теплофикация термодинамически по-прежнему остается наиболее эффективным способом производства тепловой и электрической энергии. Эффективность теплофикации в значительной степени определяется выбором оптимальной доли тепловой энергии, отпускаемой от отборов турбин, к максимальной нагрузке ТЭЦ ($\alpha_{ТЭЦ}$). В условиях рынка оптимальное значение $\alpha_{ТЭЦ}$ находится в сильной зависимости от экономических факторов и механизмов функционирования энергетики в целом.

К экономическим факторам относятся: режимы работы и эксплуатация в условиях рынка, текущая стоимость денег (кредитов), стоимость строительства объекта генерации и эксплуатационные расходы, тарифы на тепловую энергию.

Выполнены исследования по определению влияния различных факторов на выбор оптимального значения $\alpha_{ТЭЦ}$. Расчетные исследования проводились в рамках календарного года с разбивкой его на типовые дни в зависимости от климатических условий. Графические результаты исследований представлены на рис. 1.

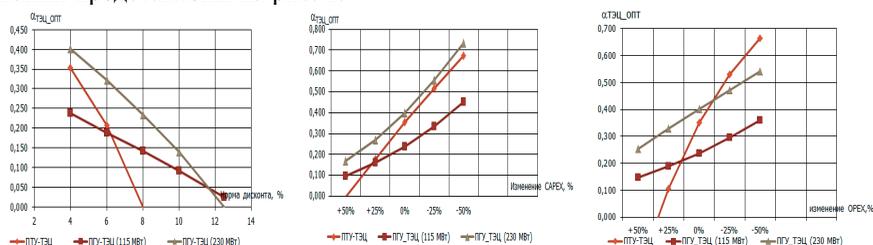


Рис.1. Влияние некоторых факторов на $\alpha_{ТЭЦ_опт}$

Полученные результаты показывают:

- наибольшее влияние на эффективность строительства оказывает текущая стоимость денег; целесообразность строительства ТЭЦ появляется при ставке дисконтирования $r = 6—8\%$ для паротурбинного оборудования и $r = 8—10\%$ для парогазового оборудования;
- увеличение капитальных и эксплуатационных затрат на 10 % снижает оптимальные значения $\alpha_{ТЭЦ}$ в среднем на 0,04—0,07 и 0,02—0,07 соответственно для ПГУ-ТЭЦ и ПТУ-ТЭЦ.

ТЕПЛОВАЯ СХЕМА С ВЫТЕСНЕНИЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ

Основная проблема развития теплоэнергетики состоит в том, что в предстоящие 15—17 лет 60 % (76 млн кВт), оборудования действующих ТЭС достигнут предельной наработки и потребуется ежегодно проводить замещение мощности в 5—6 млн кВт. Парк конденсационных турбин К-330-240 составляет порядка 17 % от общей установленной мощности паросиловых станций России.

Перспективным путем решения этой проблемы является внедрение парогазовых установок различного типа и назначения. Первый известный и наиболее дешевый способ, это так называемая пристройка ГТУ, уходящие газы которой используются для полного или частичного подогрева основного конденсата и питательной [1].

Достоинствами такой схемы являются: малые габариты ГТУ и ГВП, относительно небольшие инвестиционные средства, а также малый срок ввода в эксплуатацию.

Произведено исследование двух вариантов модернизация «старой» очереди блока К-330 путем установки ГТУ с котлом утилизатором, который позволяет «вытеснить регенерацию».

Анализ проводился для двух основных вариантов:

- 1) Вытеснение регенерации только группы ПВД.
- 2) Вытеснение регенерации всей группы ПВД и части ПНД.

Исследование проводилось для двух типов турбин ГТУ — российского и зарубежного производства.

Результаты показали, что при вытеснении отборов мощность выросла на 160 МВт, КПД увеличился на 1,7 %, удельный расход условного топлива уменьшился на 5 %;

Таким образом, внедрение ГТУ позволяют обеспечить высокую экономичность, надежность и маневренность, а также снизить негативное влияние на окружающую среду.

Литература

1. **Цанев С.В., Бузов В.Д.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОБЛОКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЭЦ

Переход теплоэнергетики с плановой на рыночную систему экономики привел к изменению ценообразующих механизмов и, как следствие, к изменению советских методов и критериев оценки эффективности энергоблоков. На текущий момент не существует объективных критериев оценки энергообъектов. Все критерии, которые используются для сравнения, имеют серьезные ограничения и допущения, что сильно сужает область, где эти критерии могут дать объективный результат.

Автором был разработан «энерго-экономический» метод, который позволяет провести технико-экономическую оценку любого энергопроекта без необходимости проведения сложных расчетов:

$$K_{ЭЭ} = \frac{C_{\text{топ}}}{K_3} (\eta_3 K_3 + \eta_T K_T - 1) = K_1 K_2, \quad (1)$$

$$K_3 = \left(\frac{P_{ЭМ}}{\tau_3} + P_{ЭЭ} \right), \quad K_T = \frac{P_{ТЭ}}{P_B}, \quad C_{\text{топ}} = B Q_H^p P_B,$$

где $P_{ЭМ}$, $P_{ЭЭ}$, $P_{ТЭ}$, P_B — тариф на электрическую мощность, электро-энергию, тепловую энергию, стоимость энергии топлива соответственно;

B — количество расходуемого топлива за период;

Q_H^p — низшая рабочая теплота сгорания топлива;

τ_3 — число часов использования электрической мощности за период;

$C_{\text{топ}}$ — суммарная стоимость затраченного топлива;

K_3 — суммарные капитальные затраты на проект;

η_3 , η_T — электрический и тепловой КПД (балансовый метод);

$K_1 = \frac{C_{\text{топ}}}{K_3} = \frac{B Q_H^p P_B}{K_3}$ — количественный (масштабный) коэффициент;

$K_2 = (\eta_3 K_3 + \eta_T K_T - 1)$ — качественный коэффициент.

Энерго-экономический метод — гибкий инструмент, позволяющий не только учитывать все аспекты исходных условий, но и сравнивать варианты с различными допущениями, однако на точность метода сильно влияет достоверность исходных условий.

А.М. Латыпов, студ.; рук. С.В. Цанев, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА АТОМНОГО ЭНЕРГОБЛОКА ТИПА ВВЭР 1000 С ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКОЙ ПО ПАРОГАЗОВОЙ СХЕМЕ

Тепловая схема паротурбинной установки на насыщенном водяном паре двухконтурной атомной электростанции предусматривает паровой промежуточный перегрев пара после части высокого давления в сочетании с сепарацией влаги. Компактность сепаратора-перегревателя и его установка непосредственно у турбин оправдывают такое техническое решение, и оно является типовым. Вместе с тем не удается в достаточной мере повысить экономичность установки.

Применение перегрева пара с использованием органического топлива в специальном «огневом» пароперегревателе [1] позволило бы значительно улучшить показатели электростанции на насыщенном водяном паре. Однако ряд факторов: дороговизна конструкционных материалов, усложнение компоновки станции и другие, не дают возможности внедрить эту схему.

Возможно создание парогазовых установок на базе двухконтурных атомных электростанций на насыщенном водяном паре (АПГУ), работающих по парогазовому циклу [2]. Возможно несколько вариантов исполнения: использование уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ) для промежуточного перегрева пара; то же, для первичного перегрева пара; пиковая АПГУ с выработкой электроэнергии в часы пик по парогазовому циклу за счёт вытеснения регенерации паротурбинной установки и догрева питательной воды в газоводяном экономайзере.

Анализ ранее полученных результатов показывает, что наибольшими потенциальными возможностями обладает АПГУ с газовым промперегревом пара. Эти возможности, однако, можно реализовать только на блоке электрогенератора мощностью 1200 МВт в паре с турбиной К-1000-60/3000 ЛМЗ [3]. Поэтому необходимо более подробно исследовать данный вариант как с точки зрения тепловой экономичности, так и с точки зрения технической реализации.

Литература

1. **Маргулова Т.Х.** Атомные электрические станции. М.: Высш. шк., 1984.
2. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. — 3-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
3. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ПОЛУЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ НА ТЭС СЖИГАЮЩИХ ГАЗ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ АГРЕГАТОВ

В ближайшие 20 лет в России увеличение добычи природного газа возрастет на 27 %, а общий объем добываемого газа достигнет 750 млрд м³ в год. Доля использования природного газа в мировом топливно-энергетическом комплексе к 2050 году возрастет до 30 %, а в России уже к 2020 году до 57 %.

В России значительными потребителями газа являются ТЭС, на которые он поступает от газораспределительных станций (ГРС) с давлением 0,7—1,3 МПа. Перед котлами ТЭС это давление снижается до 0,13—0,2 МПа за счет его дросселирования в газорегуляторном пункте (ГРП). С точки зрения энергосбережения и получения дополнительной мощности ТЭС весьма перспективным является утилизация энергии избыточного давления газа, под-

водимого к ГРП в турбодетандерных агрегатах. Такие агрегаты мощностью 5 МВт успешно эксплуатируются с 1995 года на ТЭЦ-21, а с 2008 — на ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго».

Нами для блочной ТЭС мощностью 3600 МВт был рассчитан эффект применения турбодетандерных агрегатов для получения дополнительной мощности за счет использования перепада давления газа от ГРС до котельного агрегата. Чтобы температура газа после турбодетандера соответствовала требуемому значению на входе в котел, газ на входе в турбодетандер подогревают в теплообменнике отборным паром турбины.

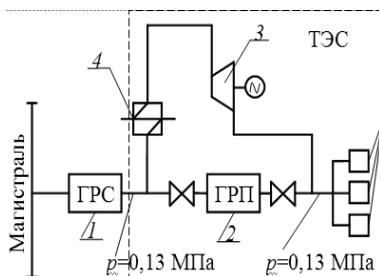


Рис. 1. Схема применения турбодетандера:

- 1 — газорегуляторная станция; 2 — газорегуляторный пункт; 3 — турбодетандер для выработки электроэнергии; 4 — теплообменник для подогрева газа; 5 — котельные агрегаты

В предлагаемой схеме (рис. 1) турбодетандеры устанавливались на ГРП. Газ снижал свое давление с 1,3 МПа на входе в турбодетандер до 0,13 МПа на его выходе, что соответствовало требованию по давлению газа на входе в котел. Установка турбодетандера вместо простого дросселирования газа на ГРП ТЭС мощностью 3600 МВт позволяет повысить ее мощность на 40 МВт и применить существующие типы турбодетандеров.

Н.А. Руднев, студ.; рук-ли А.А. Дудолин к.т.н., доц.;
В.Ф. Касилов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Ввиду ограниченных ресурсов полезных ископаемых, а именно органического топлива (в основном нефти и газа) и увеличения доли его потребления, возникает необходимость в поиске и внедрении новых способов по увеличению эффективности существующих технологий, а также разработка новых [1].

Одним из способов повышения тепловой экономичности является использование парогазовой технологии в энергоблоках АЭС с реакторами малой и средней мощности. При использовании парогазовой технологии на АЭС появляется возможность получения в котле-утилизаторе пара с температурой более 500 °С, что позволит отказаться от применения дорогостоящего сепаратора-перегревателя и выполнить проектирование турбины для условий перегретого пара [2]. Данные решения в значительной мере позволяют повысить не только экономичность энергоустановки, но маневренность и надежность её основного оборудования. Ниже приведена сводная таблица результатов сравнения эффективности энергоблока до и после внедрения парогазовой технологии с реактором СВБР-100.

Таблица

Результаты сравнения

Показатель	Значение	
	Без ГТУ	С ГТУ
Общая электрическая мощность блока $N_{Э}$, МВт	101.3	328.1
Мощность паротурбинной установки, МВт	101.3	187.6
КПД блока $\eta_{Э}$, %	35.5	45.4

Расчеты показали, что применение парогазовой технологии в энергоблоке с ядерным реактором СВБР-100 позволяет получить КПД на уровне 45 %. Таким образом, использование парогазовых технологий в схемах атомных энергоблоков является эффективным способом повышения экономичности АЭС.

Литература

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

2. **Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Господченков И.В.** Эффективность использования парогазовой технологии в энергоблоке АЭС с ядерным реактором СВБР-100 // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 14—20.

О.А. Смагин, студ.; рук. Ю.В. Абасев, к.т.н., доц. (КГЭУ, г. Казань)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА ПУТЕМ УСТАНОВКИ БЛОКА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ВЕРХНЕГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Блоки повышенной эффективности (БПЭ) от обычных энергетических блоков отличаются тем, что в котле за основным котельным экономайзером по ходу газов дополнительно установлен турбинный экономайзер, а подача питательной воды в котельный экономайзер предусмотрена двумя потоками: основным потоком, после нагрева в ПВД системы регенеративного подогрева турбины, и байпасным потоком, отводимым из системы регенеративного подогрева на промежуточном участке, преимущественно перед ПВД, он поступает в турбинный экономайзер при более низкой температуре, чем температура основного потока, нагревается в турбинном экономайзере за счет дополнительного отбора тепла у дымовых газов и подается в котельный экономайзер в смеси с основным потоком. Для регулирования соотношения расходов питательной воды в обоих потоках на основном и байпасном трубопроводах установлены задвижки.

Смысл установки БПЭ — повышение КПД котла за счет снижения температуры дымовых газов. Такой энергоблок при отключенных байпасном трубопроводе и турбинном экономайзере работает как обычный энергоблок ТЭС. При байпасировании части основного потока питательной воды перед последним ПВД переходит на работу в режиме повышенной эффективности. В этом режиме расход пара из отборов турбины на работу ПВД уменьшается пропорционально уменьшению расхода питательной воды через ПВД, и освободившийся пар направляется в хвост турбины, вырабатывая дополнительную электрическую мощность без увеличения расхода пара на турбину, т.е. при неизменной паропроизводительности котла. Однако это ведет к некоторому снижению экономичности (КПД) турбоустановки за счет увеличения сброса пара в конденсатор. Сроки окупаемости реконструкции не превышают 4—6 лет.

Литература

1. **Кудинов А.А.** Энергосбережение в теплогенерирующих установках: Ульяновск: УлГТУ, 2000.
2. **Аронов И.З.** Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных: М.: Энергия, 1967.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕАЭРАЦИИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ДЛЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ

При разработке нефтепромысловых месторождений для паротеплового воздействия на нефтяные пласты используется водяной пар, получаемый как в стационарных котельных установках, так и в передвижных. Одной из особенностей эксплуатации этих котельных установок является работа без возврата конденсата от потребителя. И расход подпиточной воды равен количеству отпускаемого пара. Для повышения качества деаэрационной обработки воды и снижения расхода пара на собственные нужды котельных установок предлагается использовать деаэраторы перегретой воды с кавитационно-разгонными устройствами (КРУ).

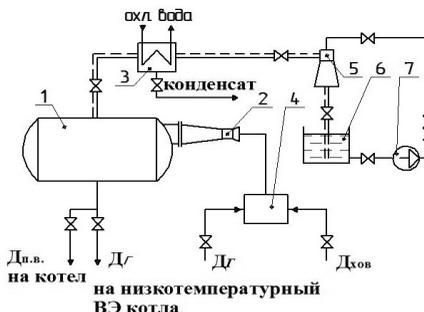


Рис. 1. Принципиальная схема деаэратора перегретой воды с КРУ:

1 — корпус деаэратора; 2 — кавитационно-разгонное устройство (КРУ); 3 — охладитель выпара; 4 — смешивающий подогреватель; 5 — водоструйный эжектор; 6 — бак рабочей воды; 7 — насос для подачи рабочей воды

деаэраторы перегретой воды с кавитационно-разгонными устройствами (КРУ) [1]. Результаты испытаний экспериментальной установки и опытно-промышленной установки на центральной отопительной котельной Самарской ГРЭС [2] стали основой для расчетов тепловых характеристик и конструктивных размеров КРУ. Расчеты выполнены для деаэраторов производительностью 20 т/ч, 35 т/ч, 100 т/ч, 175 т/ч; при давлении в деаэраторе: 0,0147 МПа, 0,0294 МПа, 0,045 МПа.

Принципиальная схема деаэратора перегретой воды с кавитационно-разгонными устройствами (КРУ) приведена на рис. 1.

Технологическое преимущество деаэратора в том, что теплоносителем может служить предварительно продеаэрированная в том же деаэраторе горячая вода, которая нагревается в низкотемпературном (ВЭ) экономайзере котла. Наличие низкотемпературного водяного экономайзера повышает КПД котла, исключается расход пара на собственные нужды, что увеличивает полезную паропроизводительность котельной установки.

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.

Е.В. Сорокина, студ.; рук. Д.А. Некрасов, к.т.н., доц. (МАМИ, Москва)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ БИНАРНОГО ЭНЕРГОБЛОКА, УТИЛИЗИРУЮЩЕГО ТЕПЛО ОДНОФАЗНОГО ВОДНОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В условиях современного развития энергетики актуальной проблемой является вовлечение тепла низкотемпературных геотермальных ресурсов в энергооборот с целью генерации электроэнергии. Широкое распространение в мире (в особенности в странах с существенными запасами низкопотенциальных геотермальных ресурсов) получили геотермальные электрические станции (ГеоЭС) с бинарным циклом [1].

Для разработки схем ГеоЭС с бинарным циклом важнейшим вопросом является выбор оптимального рабочего тела. Необходимо учитывать ряд критериев выбора оптимального теплоносителя, в частности, рабочее тело должно быть взрывобезопасным, нетоксичным, инертным к применяемым конструкционным материалам, негорючим, химически стабильным, эффективным по экономическим показателям, должно обладать определенными теплофизическими свойствами. Необходимо так же учитывать условия эксплуатации и создания ГеоЭС с бинарным циклом [1].

В данной работе рассмотрен выбор оптимального рабочего тела для использования в бинарной установке единичной мощностью до 10 МВт с целью утилизации тепла однофазных водных геотермальных ресурсов с температурой в диапазоне 100 — 180 °С. Проведена предварительная оценка КПД установки и составлен приоритетный список рабочих тел. Выполненный анализ учитывает форму правой пограничной кривой рабочего тела в координатах $T-s$, влияющей на состав оборудования бинарного энергоблока (возможность рекуперации тепла в контуре) [2].

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и сооружении блоков ГеоЭС, использующих низкотемпературные геотермальные источники для выработки электроэнергии [3].

Литература

1. **Геотермальная** энергетика / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.И. Семёнов, А.А. Шипков. М.: Теплоэнергетик, 2015.

2. **Сравнительная** эффективность термодинамических циклов геотермальных энергоблоков / М.Ю. Боярский, О.А. Поваров, А.И. Никольский, А.А. Шипков // Новое в российской электроэнергетике. 2005. № 9.

3. **Тенденции** и перспективы развития геотермальной энергетики / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семёнов и др. // Теплоэнергетика. 2012. № 11.

Д.В. Степанишин, студ. ;
рук. Е.Н. Потапкина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-ТОИ

Основная проблема АЭС кроме их дороговизны связана с их низкой маневренностью. Решить данную проблему помогает система аккумулирования тепловой энергии (САТЭ). Данная технология аккумулирования теплоты обеспечивает не только неизменность тепловой мощности реакторной установки, но и сохраняет в маневренных режимах высокие значения КИУМ. В основу системы САТЭ положена передача избыточного тепла ядерной паропроизводящей установки в бак-аккумулятор в период провала в потреблении электроэнергии и соответственно возврат его в тракт основного конденсата турбоустановки с целью получения избыточной мощности на турбогенераторе в периоды дефицита потребления электроэнергии. В настоящее время САТЭ разрабатывается применительно к проекту «ВВЭР-ТОИ».

Проект «ВВЭР-ТОИ» направлен на обеспечение конкурентоспособности российской технологии ВВЭР на международном рынке [1]. Проведенные технико-экономические расчеты показали, что АЭС с 2 блоками ВВЭР-ТОИ без САТЭ обеспечивает производство электроэнергии в объеме $1,853 \cdot 10^{10}$ кВт·ч/год с себестоимостью 0,505 руб/(кВт·ч), что примерно на 85,3 % ниже средневзвешенного отпускного тарифа, равного 1,93 руб/(кВт·ч). В режиме суточного регулирования энергоблок без САТЭ работает с пониженным КИУМ до 0,821, что повышает себестоимость электроэнергии до 0,555 руб/(кВт·ч). В случае использования САТЭ за счет накопления энергии в период ночной загрузки и выдачи ее в сеть в дневной период КИУМ увеличивается до 0,89, себестоимость электроэнергии падает до 0,514 руб/(кВт·ч). При проведении расчетов был определен КПД САТЭ, который составил 82,46 %.

Литература

1. Бельский А.А., Чаховский В.М. Оценка технической возможности и экономической целесообразности работы АЭС с ВВЭР в маневренных режимах за счет использования тепловых аккумуляторов энергии во втором контуре // Сборник трудов ОАО ВНИИАЭС за 2009 г. М., 2010.

ПЕРЕХОД К СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ПАРА НА ТЭС

Срок службы энергоблоков ТЭС составляет примерно 40 лет, при этом множество российских энергоблоков исчерпали данный ресурс. Целесообразность постепенного перехода к энергоблокам со суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП) в России в настоящее время обусловлена следующими обстоятельствами. Повышение параметров пара — это один из наиболее эффективных способов повышения КПД ТЭС. Переход к ССКП дает значительный эффект как в традиционных технологиях сжигания топлива, так и в комбинированных парогазовых технологиях. Повышение параметров и, как следствие, уменьшение тепловых выбросов — главный путь решения глобальной экологической проблемы. Переход на ССКП способен увеличить долю использования твердого топлива относительно жидкого и газообразного [1].

В настоящее время энергоблоки на ССКП надежно работают в США, Германии, Дании, Японии. Эффект от повышения начальных параметров пара наглядно представлен в Японии («Кавагое-1», «Кавагое-2»), где при повышении начальной температуры до 566 °С получена экономия топлива в 5% по сравнению с блоками на сверхкритических параметрах пара (СКД).

В России также имеется опыт эксплуатации таких станций. Так, в 1966 г. на Каширской ГРЭС началась опытно-промышленная эксплуатация блока, работающего на ССКП. На сегодняшний день в России не работает ни один энергоблок на ССКП, что подтверждает актуальность данной темы.

В развитых странах мира успешно эксплуатируются угольные энергоблоки с параметрами пара 28—30 МПа и температурой 595—620 °С. Поэтому для российской энергетики актуальна разработка проектов с аналогичными параметрами пара. В России уже изготовлены опытные партии труб на высокое давление и температуру до 650 °С [1, 2].

Литература

1. **Основы** современной энергетики. Том 1. Современная теплоэнергетика / под ред. А.Д.Трухня. М.: Изд.дом МЭИ, 2008.
2. **Скоробогатых В.Н.** Новые конструкционные материалы для угольных энергоблоков на ССКП. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ndexpo.ru>

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

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 280 МВт

На ТЭЦ-16 (филиал ПАО «Мосэнерго») в декабре 2014г. введен в эксплуатацию энергоблок ПГУ-420Т. В 2014—2015 гг. проведены тепловые испытания газотурбинной установки SGT5-4000F, работающей в составе этого энергоблока. В докладе рассмотрены условия проведения и результаты выполненных тепловых испытаний.

Электрическая мощность ГТУ в стационарных условиях при температуре наружного воздуха, равной 24 °С, составляет 266 МВт, при понижении этой температуры до –12 °С мощность повышается до 303 МВт, расход воздуха на входе в компрессор увеличивается с 647 до 727 кг/с (расчет по стандарту [1]). При снижении температуры наружного воздуха с 24 до –12 °С температура газов в турбине монотонно и линейно снижается с 1250 до 1200 °С на входе (расчет по стандарту [1]) и с 590 до 545 °С на выходе, а КПД ГТУ увеличивается с 38,8 до 39,8 %.

Расход тепла в камеру сгорания на холостом ходу составляет 150 МВт, или примерно 20 % от номинального значения. КПД ГТУ снижается по мере уменьшения нагрузки. На режимах с нагрузками 100-110 МВт, соответствующими полному прикрытию ВНА, КПД ГТУ «брутто» составляет 28,2—29,2 %, при максимальных нагрузках 39,8 %.

При повышении приведенной частоты с 0,98 до 1,04 (снижение температуры наружного воздуха с 24 до –12 °С) максимальный КПД компрессора уменьшается с 89,6 до 86,4. На высоких нагрузках КПД турбины составляет около 89—91 %, при работе на холостом ходу он снижается до ~77 %.

В исследованном диапазоне нагрузок выбросы окислов азота при работе на газе не превышают 35 ppm, при работе на дизельном топливе — 65 ppm. В диапазоне нагрузок ГТУ от 50 до 100 % номинальной камеры сгорания работает без недожога, практически без образования монооксида углерода. При более низких нагрузках его концентрация в продуктах сгорания резко увеличивается и составляет 500 ppm при нагрузке ГТУ 55 МВт.

Обработка результатов испытаний, проведенных с использованием штатной системы измерений, позволила получить достоверные данные о параметрах и показателях ГТУ SGT5-4000F и ее основных элементов в широком диапазоне изменения нагрузок и климатических условий. Полученные характеристики ГТУ SGT5-4000F могут быть использованы для планирования работы и контроля технического состояния ГТУ при отсутствии заводских данных о переменных режимах.

Литература

1. ISO 2314:2009. Турбины газовые. Приемочные испытания.

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

СПОСОБ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРА И ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГТУ

Для исследования и оптимизации режимов работы ГТУ, а также контроля их технического состояния необходимо располагать методикой численного исследования статических режимов работы ГТУ в широком диапазоне нагрузок с учетом климатических условий, результаты расчетов должны быть максимально приближены к опытным значениям, полученным при режимных испытаниях.

Параметры рабочего тела ГТУ в нерасчетных режимах работы могут быть определены по совмещенным характеристикам компрессора и газовой турбины. Совмещенные характеристики компрессора и ГТ, как правило, являются собственностью разработчика ГТУ и согласно стандарту [1] не входят в число обязательной технической документации, передаваемой заказчику оборудования. Их невозможно достоверно построить на основании расчетов, базирующихся на теоретических положениях, и единственным способом их получения являются тепловые испытания.

Для построения характеристик ГТУ необходимо определить структуру аппроксимирующих зависимостей, весовые коэффициенты в которых можно найти методами статистической обработки опытных данных. Структура уравнений аппроксимирующих зависимостей выбирается с учетом теории турбомашин и эмпирических исследований влияния параметров ГТУ на рассматриваемый показатель. Так, из экспериментальных исследований установлено, что приведенный расход газа через турбину практически неизменен в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной нагрузки. Из этого условия может быть получено уравнение совместной работы компрессора и турбины, устанавливающее связь степени сжатия с относительным приведенным расходом воздуха на входе в компрессор и отношением температуры газа перед турбиной к температуре воздуха на входе в компрессор.

Достоверность разработанного способа подтверждена сопоставлением результатов расчета эксплуатационных режимов с результатами обработки экспериментальных данных, представленных в отчетных материалах. Он обеспечивает достаточную сходимость с опытными данными и может быть положен в основу методики расчета тепловой схемы ГТУ.

Литература

1. ISO/DIS 2314 Gas turbines-Acceptance tests (MOD).

РАЗРАБОТКА ПГУ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Главной тенденцией увеличения энергетических мощностей сегодня стало строительство мощных парогазовых установок (ПГУ). Актуальность таких разработок связана с высокими экологическими параметрами ПГУ, увеличением экономичности, малой стоимостью газа, используемого как топлива, а также временем строительства электростанции [1].

Благодаря разработке турбинных лопаток из специальных сплавов, систем охлаждения, эффективных компрессоров и современных камер сгорания получены высокие показатели ГТУ мощностью 300-480 МВт с КПД свыше 38 %. Ведущие мировые фирмы (Siemens, Alstom Power, MHI, GE Energy) создают и вводят в эксплуатацию ПГУ с КПД свыше 60 % [1].

В выполняемой на кафедре ТЭС НИУ «МЭИ» магистерской работе проводится исследование по выбору оптимальной конфигурации ПГУ большой мощности. Пример одного из вариантов тепловой схемы на базе газовой турбины M701F5 MHI (Япония) приведен на рис. 1 [2].

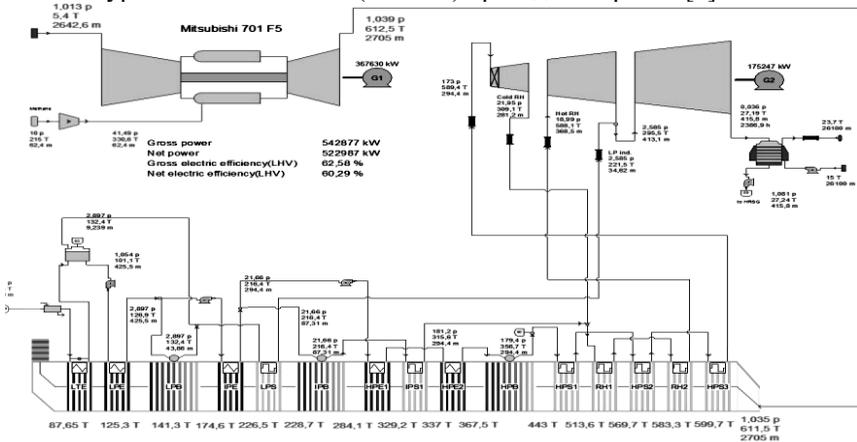


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ на базе турбины M701F5.

При такой компоновке, вырабатываемая мощность электростанции составляет 543 МВт, а КПД 63 %.

Используя мировой опыт, в России также ведутся работы по созданию ГТУ большой мощности, что позволит создать собственные энергоблоки ПГУ с КПД не ниже зарубежных аналогов.

Литература

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mhi.ru>

Т.С. Цивлина, студ.; рук. Е.В. Макаревич, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ЗАМЕЩЕНИЯ УСТАРЕВШИХ ТУРБОУСТАНОВОК Т-100-12,8 УТЗ

В отечественной энергетике наиболее распространенной теплофикационной турбоустановкой является Т-100-12,8 производства ЗАО «Уральский турбинный завод. В период с 1961 года по 2013 год было выпущено 245 машин различных модификаций [1], к настоящему времени более 50 % из них выработали свой парковый ресурс [2].

Одним из перспективных направлений замещения мощностей, выработавших свой ресурс, является строительство высокоэкономичных парогазовых энергоблоков. Однако в нынешних геополитических условиях строительство и техническое обслуживание ПГУ на базе оборудования зарубежного производства становится весьма затруднительным и дорогостоящим. К тому же не на каждом объекте имеется возможность разворачивания площадки строительства в непосредственной близости. Таким образом, проблема замены устаревшего оборудования в условиях ограниченных пристанционных территорий становится наиболее острой.

Предлагается несколько путей решения проблемы:

- демонтаж выработавшего ресурс турбоагрегата с последующей установкой на тот же фундамент аналогичной турбоустановки современной модификации;

- реконструкция турбины с увеличением тепловой и электрической мощности, позволяющая продлить ресурс на 200 тыс. часов.

Стоит отметить, что в первом случае необходимо предусмотреть увеличение паропроизводительности котельных агрегатов, связанное с увеличением номинального расхода пара в голову турбины на 5—7%. При этом работа котлов на нагрузке выше номинальной в большинстве случаев ограничена [3]. Использование второго варианта требует исследования совместной работы обновленной турбоустановки с прежним или частично обновленным вспомогательным оборудованием.

Литература

1. **Семейство** теплофикационных турбин Т-100-12,8: вчера, сегодня, завтра / А.Е. Валамин, А.Ю. Култышев, Т.Л. Шibaев и др. // Теплоэнергетика. 2013. № 8.
2. **Модернизация** паровых теплофикационных турбин типа Т-100/110-130 / А.Е. Валамин, Ю.А. Сахнин, В.Б. Новоселов, А.А. Ивановский // Энергетика и ТЭК. 2009. № 11.
3. **Холщев В.В.** Испытания котельного агрегата ТГМ-96 на нагрузке выше номинальной // Теплоэнергетика. 2011. № 3.

Д.А. Юпатов, студ.; рук. В.Б. Прохоров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ПОДОГРЕВА СЫРОЙ В ОДЫ

Одна из приоритетных задач энергетики — внедрение энергосберегающих технологий, разработка и применение методик, основанных на принципах рационального использования энергоресурсов. Снижение переменных издержек за счет экономии топлива путём замены системы подогрева сырой воды в пароводяных теплообменниках на подогрев в водоводяных теплообменных аппаратах является примером таких технологических решений.

В рамках данной работы рассматривалась очередь 130 ата ТЭЦ-21.

Для надежной работы оборудования химводоподготовки добавочную воду необходимо подогревать до температуры не менее 30 °С, что по проекту обеспечивается в пароводяных подогревателях сырой воды, которые питаются паром от коллектора 3 ата, куда в свою очередь пар коллектор поступает из промышленного отбора турбины ПТ-80/100-130/13 через РОУ 13/3, а в период ее останова — через РОУ 140/13 непосредственно от энергетических котлов, подогрев сырой воды ведется высокопотенциальным паром. Эта схема неэнергоэффективна и неэкономична.

В предлагаемой схеме подогрев сырой воды будет осуществляться из линии обратной сетевой воды в турбоустановках очереди 130 ата ТЭЦ-21.

Экономия топлива при этом по оценкам составит 4,9 тыс. т у.т. Общая экономия от внедрения схемы составит 27,6 млн руб. в год. Капитальные затраты на установку трех водоводяных подогревателей составляют 6 млн руб. [1]. Дисконтированный срок окупаемости проекта 1,5 года.

Применение водоводяных теплообменников для подогрева сырой воды ведет к снижению переменных издержек за счет экономии топлива; позволит дозагружать теплофикационный отбор в неотопительный период; снизить себестоимость электроэнергии за счет снижения удельных расходов топлива на выработку э/э; повысить конкурентоспособность станции на рынке э/э за счет увеличения регулировочного диапазона; открывает огромные перспективы применения по всей стране из-за большого количества однотипных схем подогрева добавочной воды.

Литература

1. [Электронный ресурс]. ООО «Нижегородский завод теплообменного оборудования». URL: // <http://nnzto.ru/>

КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент С.В. Мезин
Секретарь секции — ассистент Ю.С. Бурцева

А.Ю. Батракова, А.В. Посохов, студенты;
рук. Е.И. Мерзликина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПОИСКОВОГО МЕТОДА РАСЧЕТА НАСТРОЕК ДЛЯ АСР С ИНЕРЦИОННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ

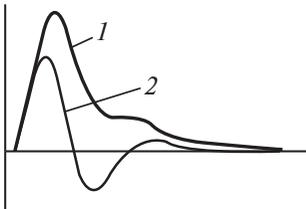


Рис. 1. Переходная характеристика одноконтурных АСР по каналу регулирующего воздействия для предлагаемого метода (1) и настроек традиционного метода (2)

В работе сравнивается «традиционный» метод настройки типовых регуляторов с универсальным беспойсковым методом [1]. Для оценки качества одноконтурной АСР с ПИД-регулятором и инерционным тепловым объектом второго порядка с запаздыванием её параметры были рассчитаны при ограничении на корневой показатель колебательности $m = 0,366$. В результате получены значения $K_p = 7,7$, $T_i = 26,7$; $T_d = 21,4$. Далее были рассчитаны параметры настройки ПИД-регулятора с помощью беспойскового метода: $K_p = 6,0$; $T_i = 96,8$ с; $T_d = 14,3$ с. Чтобы оценить качество регулирования, построены переходные процессы при единичном ступенчатом возмущении, поданном на вход объекта по каналу регулирования (рис. 1).

Из графиков 1 и 2 видно, что при применении беспойскового метода, заметно увеличилось динамическое отклонение и незначительно — время регулирования. С другой стороны, процесс получается практически неколебательным. Также преимуществом данного метода является его простота.

Литература

1. Пикина Г.А, Бурцева Ю.С. Беспойсковая настройка линейных регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С. 23—27.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB-SIMULINK АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ СЕРВОМОТОРА И РЕГУЛИРУЮЩЕГО БЛОКА С ИМПУЛЬСНЫМ ВЫХОДОМ

В АСУТП на объектах теплоэнергетики используются в основном исполнительные механизмы на базе электроприводов (сервомоторов) постоянной скорости, которые управляются импульсными сигналами от регулирующих блоков с импульсным выходом. В таких системах могут оказывать существенное влияние различные нелинейности и другие факторы, искажающие расчетный алгоритм регулирования. Особенно важно их учитывать для систем, содержащих малоинерционные контуры. В частности, это относится к АСР температуры перегретого пара. Одним из эффективных путей учета указанных факторов является численное моделирование, например, в среде Matlab-Simulink. В этой среде была создана модель АСР температуры перегретого пара с использованием подмоделей релейно-импульсного регулирующего блока и сервомотора постоянной скорости с учетом его инерционности, люфта и ограничения выхода. Особенностью модели сервомотора является способ ограничения его выхода путем имитация конечных выключателей, а не путем применения стандартного блока ограничения сигнала после интегратора.

Первоначальная настройка регулирующего блока принята на основе расчетов в среде MathCad. Была рассмотрена замена ПИ-регулятора в двухконтурной системе на релейно-импульсный регулятор для следующих вариантов: 1) двухконтурная АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором с расчетом по методу последовательных приближений с поочередной настройкой контуров; 2) одноконтурная АСР с ПИ-регулятором.

Моделирование в среде Matlab-Simulink позволило уточнить значения параметров настройки, чтобы повысить качество переходных процессов с учетом нелинейных свойств регулирующего блока и сервомотора.

*Д.Ю. Быстрова, Е.В. Плавская, А.А. Старостин, студенты;
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЙ РЕКУРРЕНТНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Одним из эффективных направлений выхода математического аппарата анализа и синтеза систем автоматического управления за пределы линейного является переход на технологию имитационного моделирования рекуррентными выражениями элементарных линейных и нелинейных динамических звеньев.

В настоящей работе предлагается технология решения задач исследования сложных динамических систем схемами соединений рекуррентных выражений элементарных динамических звеньев.

Решена задача декомпозиции сложных передаточных функций систем рекуррентных выражений для следующих структур:

параллельное соединение рекуррентных выражений;

последовательное соединение рекуррентных выражений;

последовательное соединение рекуррентных выражений сложных динамических систем с обратными связями.

В данной работе представлена технология создания универсальной программы-функции имитационной модели системы управления из рекуррентных выражений элементарных динамических звеньев.

Данная технология использована для создания имитационной динамической модели связанной системы регулирования нагрузки и экономичности парового котла с использованием экстремального регулятора [1].

С использованием рекуррентных выражений элементарных звеньев создано математическое обеспечение задачи анализа и оптимизации сложных линейных/нелинейных схем регулирования.

Литература

1. Сабанин В.Р., Кормилицын В.И., Костык В.И. Регулирование нагрузки и экономичности паровых котлов с экстремальным регуляторов // Теплоэнергетика. 2014.

*Д.Ю. Быстрова, Е.В. Плавская, студенты;
рук. В.Р. Сабанин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС В СРЕДЕ MATHCAD ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Существующие в настоящее время аналитические методы настройки регуляторов в частотной области по основным показателям имеют следующие недостатки.

1. Настраиваемые регуляторы и объекты регулирования могут быть представлены только в линейном виде передаточными функциями.

2. Оценка качества работы настраиваемой системы регулирования в аналитических методах может быть сделана только по линейному показателю.

3. Существующий аналитический метод ориентирован только на настройку одноконтурных схем на качественное регулирование по каналу задания. Он состоит из программы-драйвера и двух программ-функций для имитационного моделирования нелинейного ПИД-регулятора с импульсным выходом и линейного объекта регулирования.

Математические модели комплекса реализованы рекуррентными выражениями для элементарных линейных и нелинейных динамических звеньев [1]. Программа-драйвер организует вызов программ-функций и размещение данных на хранение в общей памяти.

Предлагаемый программный комплекс позволит:

1. Обеспечить возможности исследования работы систем регулирования с линейными и/или нелинейными регуляторами и объектами регулирования.

2. Произвести исследование реакции данных систем регулирования на возмущения различного характера.

3. Исследовать работу систем при регулярном или случайном воздействии на интервале времени на один или несколько входов динамической системы.

Литература

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

Е.Д. Васильев, стажер; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ АСУ ТП

Решения, принимаемые при внедрении АСУ ТП на современном этапе, в основном направлены на улучшение качества регулирования, но не управления [1]. Опережающее управление [2], комплексное управление надежностью оборудования являются начальным этапом в реализации структуры управления эффективностью [3]. Управление эффективностью АСУ ТП (УЭ) подразумевает получение оптимальной иерархической структуры функциональных задач по критериям экономичности (ранг соответствующих моделей функциональных задач по чистому дисконтированному доходу от внедрения и эксплуатации функциональных задач стационарного уровня в АСУ ТП для блоков К-200 и К-300). УЭ на втором этапе создания ИАСУ предполагает оптимизацию структуры по критериям надежности с корректировкой ее в части ранга функциональных задач.

Оценка УЭ структуры для стационарного уровня в ИАСУ (пример в виде целевой системы) предполагает: оценку балансовой прибыли моделей функциональных задач стационарного уровня; определение принципов и ограничений обеспечения эффективной интеграции в ИАСУ; разработку методик: построения структуры ИАСУ на основе критерия экономичности; оптимизации структуры на основе энергетической эффективности; оценки УЭ для функциональной задачи оптимального распределения нагрузки при определении времени упреждения и времени относительного упреждения подачи возмущающих воздействий на изменение нагрузки; ранжирования моделей структуры стационарного уровня в ИАСУ с определением последовательности реализации структуры ИАСУ при УЭ.

Определены основные принципы и ограничения построения структуры ИАСУ в рамках модели ориентированной системной инженерии [4].

Литература

1. **Аракелян Э.К., Васильев Е.Д.** Современные проблемы развития АСУ ТП ТЭС // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: 19-я меж. науч.-техн. конф. студ. и асп. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. Т. 4.
2. **Аракелян Э.К., Васильев Е.Д., Хуршудян С.Р.** Проблемы современных АСУ ТП на базе ПТК и возможный путь их решения // Вестник МЭИ. 2014. № 1.
3. **Аракелян Э.К., Васильев Е.Д.** Повышение качества управления и эффективности технологических процессов // Радиозлектроника, электротехника и энергетика. 20-я меж. науч.-техн. конф. студ. и асп. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 4.
4. **Аракелян Э.К., Васильев Е.Д.** Применение практик модели ориентированной системной инженерии при реализации интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическими процессами // Сб. материалов Нац. конгресса по энергетике. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т. 2.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛИЗАЦИИ ОБ ОТКАЗЕ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР

В настоящее время все АЭС в части технических средств автоматизации удовлетворяют требованиям нормативных документов [1—3], тем не менее, в части реализации принципа разнообразия [4] иницирующая часть двух комплектов подсистемы аварийной защиты реактора реализована на идентичных программно-технических средствах.

Для дальнейшего повышения безопасности АЭС предлагается внедрение технических мероприятий, позволяющих управлять последствиями отказов по общей причине (ООП), возникающими при возможных сбоях программного обеспечения. Реализация предлагаемых мероприятий осуществляется с помощью устройства, контролирующего выполнение алгоритмов вычислительными модулями системы. При возникновении ООП программного обеспечения устройство передает сигнал на блочный пункт управления об отказе оборудования, а оператор дистанционно с помощью ключей запускает механизм АЗ.

Используя метод марковских процессов [5], в частности построением графов переходных процессов (рис. 1), был проведен расчет надежности систем безопасности по функции АЗ, который позволяет утверждать об эффективности внедрения компенсирующих мероприятий.

Литература

1. **НП-001-97.** Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
2. **НП-026-04.** Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций.
3. **НП-082-07.** Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
4. **ГОСТ Р МЭК 60880—2011.** Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А.
5. **ГОСТ Р 51901.15—2005 (МЭК 61165:1995).** Менеджмент риска. Применение марковских методов.

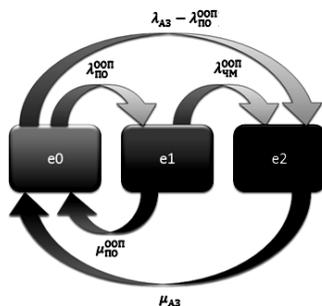


Рис. 1. Граф переходов для системы аварийной защиты при полном потоке отказов

ДВУХМЕРНАЯ СЕПАРАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР

Повышение маневренности АЭС является одной из научно-технических проблем атомной энергетики. При работе энергоблока с переменной нагрузкой нужно обеспечить требуемое значение влажности ω насыщенного пара, поступающего на турбину, которое не должно превышать 0,2 %. На отечественных АЭС с ВВЭР используются горизонтальные парогенераторы (ПГ) с гравитационной сепарацией пара, эффективность которой обратно пропорциональна действительному уровню воды в парогенераторе, который, в свою очередь, связан сложной зависимостью с массовым уровнем h , измеряемым уровнемером, и паровой нагрузкой D . Причем наблюдается существенный разброс сепарационных характеристик (СХ) $\omega(h)$ для конструктивно идентичных ПГ, причины которого не вполне ясны.

Для более качественного и надежного управления влажностью при работе с переменной нагрузкой авторами [1] было предложено использование двухмерной сепарационной характеристики (ДСХ) в виде функции двух переменных $\omega(h, d)$, где $d = D/D_0$, D и D_0 — текущая и номинальная нагрузки ПГ. ДСХ позволяет надежно и предсказуемо управлять уровнем в ПГ в режиме работы с переменной нагрузкой. При этом возможны различные варианты оптимального управления в зависимости от того, что является приоритетом. КПД паровой турбины, работающей на насыщенном паре, зависит от влажности поступающего на нее пара. По данным [2] рост влажности пара на 1 % снижает внутренний относительный КПД η_{oi} на 0,85 %. Использование ДСХ дает возможность держать уровни воды в каждом из четырех ПГ на значениях, соответствующих максимуму КПД турбины при любой мощности энергоблока и при заданном запасе воды в ПГ. Если приоритетом является надежность, то критерием качества управления становится максимальный суммарный запас воды при заданном уровне влажности. В работе оценивается значение возможного эффекта в каждом из этих сценариев управления.

Литература

1. **Гурьянова В.В., Парчевский В.М.** Двухмерная сепарационная характеристика парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Сб. трудов 17-й межд. конф. молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. Секция 3. АО ОКБ «ГИДРОПРОЕСС», Подольск, 2015.
2. **Авдеев А.А.** Пути оптимизации П контура АЭС с ВВЭР. Доклад на Международном форуме «АТОМЭКСПО 2010». URL: www.vniiam.ru.

*Р.Ф. Замалдинов, асп.; Г.И. Замалиева, студ.;
рук. К.Х. Гильфанов, д.т.н., проф. (КГЭУ, г. Казань)*

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ

В работе предложена комбинированная схема теплонасосной системы теплоснабжения (ТНСТ) жилого здания, которая включает в себя тепловой насос, первичный контур отбора теплоты от источника низкопотенциальной энергии и вторичный контур, состоящий из распределительного контура, системы напольного отопления и системы горячего водоснабжения (ГВС). ТНСТ предназначена для индивидуальных домов малоэтажной застройки в условиях средней полосы России и реализует бивалентный режим работы, т.е. при наружной температуре воздуха ниже установленной используется дополнительный электрический источник энергии.

Функционирование всей системы осуществляется под управлением мультиконтроллера с беспроводным интерфейсом связи и сенсорами.

Тепловой насос работает на контур отопления до момента заполнения буферной емкости нагретым теплоносителем, что регистрируется датчиком. Когда буферная емкость заполнена, мультиконтроллер с помощью датчика регистрирует температуру воды в баке-аккумуляторе системы ГВС, и при температуре воды ниже 45 °С, отключает тепловой насос. В противном случае работа теплового насоса переключается на контур ГВС. В случае снижения температуры теплоносителя в буферной емкости системы отопления при работе на контур ГВС, контроллер по сигналу с датчика переключает ТН на контур отопления. При этом догрев воды в системе ГВС до требуемой температуры производится дополнительным нагревателем. В случае работы ТН на контур отопления, при изменении температуры наружного воздуха по показаниям датчика, температура теплоносителя на выходе из конденсатора регулируется расходом теплоносителя в распределительном и первичном контурах. При работе ТН на контур ГВС температура теплоносителя на выходе из конденсатора поддерживается постоянной.

Таким образом, предлагаемая схема позволяет регулировать температуру теплоносителя в распределительном контуре ТНСТ и может повысить эффективность работы системы, а также снизить номинальную мощность ТН с помощью его поочередной работы на контур отопления и ГВС.

СОЗДАНИЕ ОБУЧАЮЩИХ СТЕНДОВ И ИХ ПРОГРАММНО-ЛОГИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В настоящее время все большую актуальность приобретает вопрос о создании обучающих стендов и установок, моделирующих какие-либо технологические или тепловые процессы. Необходимость создания таких стендов обуславливается прежде всего потребностью в обучении рабочего персонала, при этом без риска для людей и работы оборудования, а также высокой стоимостью учебных стендов, предлагаемых поставщиками [1].

В данной работе рассматривается обучающий стенд на базе оборудования компании Siemens, применяемый в частности для обучения программирования контроллера и наладки ЧРП. Тренажер имитирует небольшую часть автомобильного производства, а именно процесс обварки кузова. Стенд условно можно разделить на три части:

- 1) Модель установки (рис.1), состоящая из трех частотных преобразователей Siemens G120D, трех двигателей, а также модели конвейера, имитирующей движение кузова.
- 2) Шкаф управления установкой, ключевыми элементами которого являются контроллер Siemens S7-300 и модуль связи Siemens ET200S.
- 3) Панель управления МОР (Main Operator Panel), необходимая для возможности дистанционного управления конвейером.

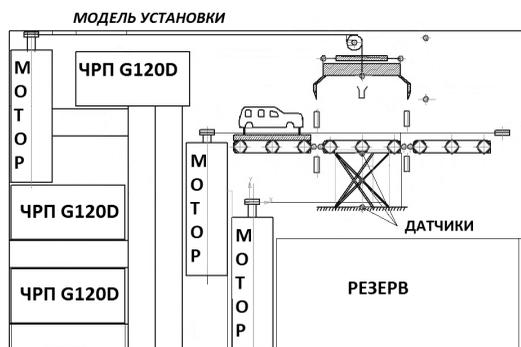


Рис. 1. Схема учебного стенда

Литература

1. Литвинов А.С., Зак Е.А., Жирбин С.В. Идеология построения учебных стендов для изучения промышленных контроллеров // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2006. Т. 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО ПУНКТА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРОВ КОМПАНИИ «ОВЕН» И «ЭТК-ПРИБОР»

Одним из главных элементов системы централизованного теплоснабжения является тепловой пункт (центральный или индивидуальный), в котором осуществляется связь между тепловыми сетями и потребителями тепловой энергии.

Тепловой пункт выполняет прием теплоносителя, его преобразование, распределение между потребителями, учет теплотребления, автоматически обеспечивая при этом необходимые параметры теплоносителя в системах отопления и вентиляции для поддержания требуемых температурных условий в обслуживаемых помещениях, поддержание температуры воды в системе горячего водоснабжения на заданном уровне, согласование и стабилизацию гидравлических режимов в тепловых сетях и в системах теплотребления.

Все эти задачи могут быть реализованы в значительной степени за счет автоматизации теплового пункта.

Была поставлена задача автоматизации теплового пункта автоматикой различных производителей и сравнения качества регулирования температуры в системах горячего водоснабжения (ГВС) и отопления.

В данной работе описано назначение, принцип действия и компоновка систем отопления и горячего водоснабжения теплового пункта. Рассмотрены общие принципы построения системы автоматического регулирования и теплотехнического контроля на тепловом пункте. Описана реализация функций автоматического управления тепловым пунктом приборами, разработанными компаниями «ОВЕН» и «ЭТК-Прибор». Проведено тестирование контроллера ТРМ132М (ОВЕН) и Трансформер-SL (ЭТК-Прибор)

Литература

1. **Руководство** по эксплуатации контроллера систем отопления и ГВС ТРМ132М-01.
2. **Руководство** по эксплуатации контроллера Трансформер-SL
3. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ. 2004.

*Е.А. Кишкин, Л.Е. Вендланд, студенты;
рук. В.Ф. Кузищин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНАЖЕР ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Тренажер создается на базе разработок Учебно-тренировочного пункта кафедры АСУТП МЭИ [1, 2]. Основной целью тренажера является повышение уровня профессионализма персонала цехов ТАИ и АСУТП электростанций. Тренажер можно также использовать для проведения соревнований оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП тепловых электростанций. Тренажер позволяет моделировать поведение системы регулирования при типовых неисправностях, связанных с неправильной статической или динамической настройкой системы при ее наладке, а также возникших в процессе эксплуатации в виде параметрических отказов. Рассматриваются АСР температуры перегретого пара и АСР уровня в барабане котла-утилизатора для энергоблока ТЭС с ПГУ.

Реализуется основная динамическая модель оборудования в виде модели объекта, регулирующего прибора, задатчика, блока ручного дистанционного управления, исполнительного механизма типа МЭО, блока сигнализации положения с токовым выходом БСПТ, тиристорного пускателя ПБР и регулирующего органа. Интерфейс тренажера содержит окна управления параметрами регулятора, вывод графиков, переключение режимов работы из автоматического в ручной с фиксацией промежуточных состояний положения.

Тренажер реализован при помощи основного языка JavaScript для введения математической начинки и вспомогательного языка программирования html для визуальной реализации графиков, формул и массивов данных. Приведенные языки позволяют организовать доступ клиентов к тренажеру через сеть Ethernet для дальнейшего использования в пределах одного инструкторского компьютера.

Литература

1. **Автоматизированная** обучающая система для подготовки персоналов цехов ТАИ / В.В. Охотин, Н.Д. Кузнецов, Г.Б. Беляев и др. // Электрические станции. 1993. № 3. С. 15—17.
2. **Применение** «Комплекса компьютерных средств подготовки персонала цехов ТАИ ТЭС» в соревнованиях профессионального мастерства / В.В. Охотин, Н.Д. Кузнецов, В.Ф. Кузищин и др. // Электрические станции. 2001. № 2. С. 41—46.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВТОРИЧНОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА ТГМП-314

Выполнена разработка математических моделей с сосредоточенными (СП) и распределенными (РП) параметрами для тепловых процессов вторичного пароперегревателя котла ТГМП-314 [1]. Объект моделирования включает две ступени поверхности нагрева, трехходовой клапан, смеситель, четыре паровых коллектора и две термопары [2].

Получены аналитические выражения передаточных функций по основному и вспомогательному каналам, предназначенных для синтеза двухконтурной системы регулирования вторичного перегрева.

Так, передаточная функция основного канала СП-модели имеет только дробно-рациональные функции

$$W_{\mu\theta}(p) = \left[(1 - m_0)D_0\mu_0W_{D_2\theta_1^k}(p)W_k^2 - (\theta_1^k - \theta_1^H)_0 \right] W_{\theta_{II}^H} W_k^2 W_{TP},$$

а РП-модель

$$W_{\mu\theta}(p, z) = \left[(1 - m_0)D_0\mu_0W_{D_2\theta_1}(p, z)W_k^2 - (\theta_1^k - \theta_1^H)_0 \right] W_{\theta_{II}^H}(p, z)W_k^2 W_{TP}$$

включает две трансцендентные составляющие вида

$$W_{D_2\theta_1}(p, z) = e^{C_1(p)z} \text{ и } W_{\theta_{II}^H}(p, z) = e^{C_2(p)z}.$$

Проведено сравнение частотных характеристик полученных моделей (рис 1, 2), показавшее неудовлетворительную точность СП-модели.

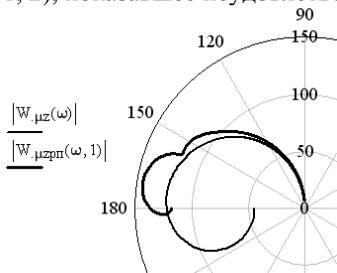


Рис. 1. КЧХ моделей вспомогательного канала

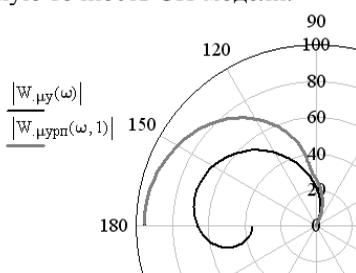


Рис. 2. КЧХ моделей основного канала

Литература

1. **Пикина Г.А.** Математические модели технологических объектов: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

2. **Инструкция** для прямооточного котла ТГМП-314П, ст. № 3,4,5 ТЭЦ-26. [Электронный ресурс].

URL: www.kafedra.asutp.lclients.ru/sau/TGMP_314_instruction.pdf

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

СОЗДАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ФУНКЦИЙ БЕЗОПАСНОСТИ (ФБ)

Атомная энергетика — перспективная и развивающаяся отрасль. Каждый год ГК «Росатом» одобряет проект нескольких новых энергоблоков. Увеличение требований к безопасности с возрастанием количества АЭС является необходимым условием дальнейшей надежной работы атомной энергетике [1]. Это значит, что необходимо увеличение требований к качеству и полноте проверок ФБ. Несмотря на рост требований к проверкам, время, выделяемое на этот этап, никто не намерен увеличивать. Это ведет к необходимости улучшать метод проверок и инструментальные средства.

Так как метод проверок является на данный момент оптимальным, было решено разработать новый инструмент для выполнения возросших требований.

Основные требования к новому инструменту — автоматически создаваемые методики проверок, полнота проверок, способность к проверкам по типу «черный и белый ящик», удобство в работе.

Данный инструмент позволит многократно увеличить полноту проверок, как возможности выполнения их по типу «черный ящик». Данный тип проверок является наиболее сложным, обширным и полным из всех видов проверок ФБ, что гарантирует высокий уровень надежности АЭС [2].

Литература

1. **Атомные** электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Классификация функции контроля и управления. Международный стандарт МЭК 61226.
2. **Руководство** пользователя ПМ ПОРТАЛ на основе ТПТС ЕМ и ТПТС НТ.

А.В. Малафеев, студ.; рук. В.С. Мухин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА МЕТРОЛОГА (АРММ)

В работе рассматриваются мероприятия по разработке АРМ метролога. Метрологические испытания (поверка, калибровка) — обязательная процедура при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации любой системы автоматизации, включающей в себя измерительные каналы и средства измерений. Процедура достаточно трудоемкая и при этом отличается от других видов пусконаладочных, плановых профилактических и ремонтных работ, проводимых со средствами и системами автоматизации энергоблока.

Сокращение сроков метрологических испытаний на фоне все возрастающих требований по снижению сроков пусконаладочных работ и плановых простоев является достаточно актуальной задачей. Наиболее эффективным способом сокращения трудоемкости работ является автоматизация всей процедуры испытаний или хотя бы отдельных операций.

Предлагаемый комплекс АРММ, разработанный по новому алгоритму, позволит автоматизировать процесс испытаний для всех цепочек измерительного канала за исключением первичных преобразователей и конечных устройств [1].

Данная разработка, безусловно, будет способствовать сокращению трудоемкости работ и повышению качества и правильности выполнения процедур метрологических испытаний измерительных каналов и измерительных устройств.

Литература

1. **Свидетельство** об утверждении типа средств измерений RU.C.34.004.A № 57995 от 04.03.2015г.

М.А. Мильчакова, студ.; рук. Г.А. Пикина, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ВВЭР-1000

На современных атомных станциях к регулированию уровня в парогенераторах блоков ВВЭР-1000 предъявляются высокие требования. Это связано с тем, что нежелательные колебания уровня приводят к снижению надежности основного оборудования станции. Основными причинами некачественного поддержания уровня являются переменное паросодержание в пароводяной смеси и отсутствие самовыравнивания в объекте.

Передаточная функция объекта регулирования (1):

$$W(p) = \frac{KS}{p^2} e^{-p\tau_0}, \quad (1)$$

где K , τ_0 — параметры объекта; S — скорость перемещения исполнительного механизма.

До сих пор в автоматической системе регулирования уровня в парогенераторе традиционно используется линейный типовой ПИ-алгоритм регулирования. Поставлена задача возможного повышения качества работы системы регулирования за счет применения алгоритма максимального быстродействия регулятора, подразумевающего перевод объекта из начального состояния в пространстве состояний в конечное за минимально возможное время [1, 2].

Дано математическое описание объекта, проведен синтез алгоритмов максимального быстродействия и параметрический синтез ПИД-алгоритма регулирования, проведено сравнение процессов с различными алгоритмами, а также исследование влияния скорости перемещения исполнительного механизма на качество процесса регулирования.

Результаты исследования подтвердили возможность перехода на другие алгоритмы в системе регулирования уровня, а также целесообразность применения исполнительных механизмов с меньшей инерционностью.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Пикина Г.А.** Оптимизация и оптимальное управление. М.: Издательский дом МЭИ, 2003.
2. **Пикина Г.А.** Адаптивные и оптимальные системы управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

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

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ ПО ПРОГНОЗУ В СВЯЗНОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Вместо общепринятого принципа управления по текущему значению ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ в работе использован принцип управления по прогнозу — значению ошибки $\varepsilon(t + \tau_{\text{пр}})$, ожидаемому через время прогнозирования $\tau_{\text{пр}}$ в будущем [1]. Система регулирования в этом случае оказывает упреждающее воздействие, в результате чего удается частично скомпенсировать инерционность объекта, т.е. отстающую во времени реакцию объекта на действия управляющего устройства.

Прогностический регулятор состоит из двух частей — собственно регулятора с типовым законом регулирования $W_p(s)$ и прогнозатора, передаточная функция которого в простейшем случае линейного прогноза равна $W_p(s) = \tau_{\text{пр}}(s) + 1$.

В работе исследуется двухсвязная система управления экономичностью процесса горения котла БКЗ-320, состоящая из одноконтурной АСР подачи топлива и двухконтурной АСР подачи воздуха. Исходные данные по динамическим характеристикам котла [2] использованы для параметрической оптимизации ПИ-регуляторов и компенсатора влияния. Компьютерное моделирование показало, что только за счет реализации принципа управления по прогнозу удастся повысить точность стабилизации давления пара перед турбиной и содержания кислорода в 1,5 раза. Дальнейшее повышение точности стало возможным повторной оптимизацией настроек ПИ-регуляторов по передаточным функциям прогностических объектов, состоящим из исходных передаточных функций с присоединением к ним соответствующих устройств прогнозирования.

Предложенные принцип управления по прогнозу и метод настройки прогностических регуляторов позволяют получить заметное повышение качества регулирования и могут быть рекомендованы для практического применения.

Литература

1. **Пикина Г.А.** Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Теплоэнергетика. 2011. № 4. С. 61—66.
2. **Давыдов Н.И., Григоренко А.А.** Локальный тренажер на базе ПТК КВИНТ для задач регулирования теплофикационного энергоблока с турбиной ПТ-80 // Труды междунар. науч. конф. Control-2003 «Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП». М.: Издательство МЭИ, 2003. С. 61—70.

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

На сегодняшний день одной из проблем в энергетической отрасли является оптимизация работы существующего оборудования котельных в новых режимах работы.

Для оперативного принятия решений и управления необходимо использовать сложные интегрированные системы [1]. Одним из возможных вариантов является применение искусственных нейронных сетей. Нейронные сети — это математическая модель, построенная по принципу функционирования и организации биологических нейронных сетей. Для работы такой математической модели необходимо провести ее обучение. Обучение нейронных сетей — это нелинейная задача многопараметрической оптимизации, которая должна производиться на основе имеющегося ряда решений и при помощи экспертов.

В качестве базы знаний нейронной сети предлагается использование результатов решения задачи многокритериальной оптимизации режимов эксплуатации котлов и энергопроизводства в целом, с учетом фактического состояния оборудования. Решения получены методом многокритериального оценивания DEA [2], который позволяет провести комплексную сравнительную оценку эффективности энергетического оборудования, учитывая совокупность параметров работы котлов.

В качестве входных сигналов будут использоваться различные критерии описания состояния оборудования, а на выходе должен появиться признак решения, которое приняла система управления.

Таким образом, применение искусственной нейронной сети позволит значительно повысить скорость принятия математически обоснованных управленческих решений, что особенно важно в нестандартных ситуациях.

Литература

1. **Гаврилова А.А.** Организация управления энергетическим производством на основе комплексных критериев деятельности. // Вестник Волжского университета им. В.Н.Татищева. 2015. № 1 (23). С. 11—16.
2. **Салов А.Г., Гаврилова Ю.В., Кухарева А.В.** Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования тепловых электрических станций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 3(31). С. 201—207.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА «КОМПЕНСИРОВАННОЙ» НАСТРОЙКИ И МЕТОДА ПООЧЕРЕДНОЙ НАСТРОЙКИ КОНТУРОВ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ПАРООХЛАДИТЕЛЕМ

Температура перегрева пара на выходе из котла относится к важнейшим параметрам, определяющим экономичность работы паровой турбины и энергоблока в целом. В работе рассмотрено два метода настройки АСР температуры перегрева пара для котла с поверхностным пароохладителем. В этом случае инерционность опережающего участка объекта регулирования оказывается соизмеримой с инерционностью основного участка, то есть обычное допущение о частотной развязке контуров здесь нарушается. Поэтому эффективность обычной методики настройки двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором с применением поочередной настройкой контуров здесь оказывается под сомнением. В работе проведен анализ эффективности этой методики с методом «компенсированной» настройки, в соответствии с которым параметры дифференциатора определяются из условия приближения суммарного сигнала к опережающему сигналу, после чего определяются параметры регулятора по эквивалентному объекту, как в одноконтурной системе. На рис.1 показаны переходные процессы, иллюстрирующие: а) метод компенсируемой настройки контуров; б) метод поочередной настройки контуров.

Можно заключить, что метод компенсированной настройки для рассматриваемой АСР является более предпочтительным, так как отклонение основной регулируемой переменной оказывается меньше при повышенном затухании процесса регулирования.

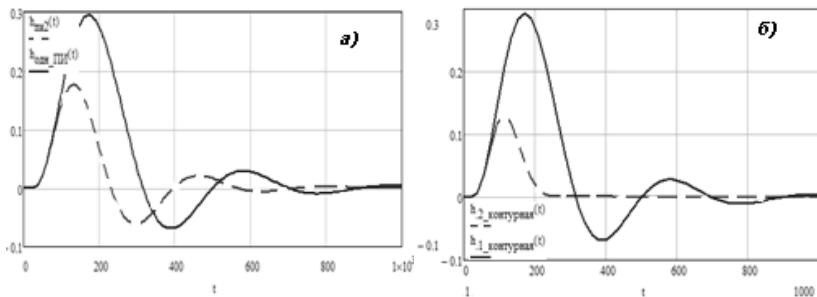


Рис. 1. Переходные процессы

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

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗБРОС СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ АЭС С ВВЭР

Для надежной эксплуатации парогенераторов (ПГ) АЭС с ВВЭР необходимо располагать их сепарационными характеристиками (СХ), показывающими зависимость влажности вырабатываемого насыщенного пара от массового уровня воды в ПГ. СХ определяются экспериментально во время пусконаладочных работ путем длительных и трудоемких испытаний. Для повышения конкурентоспособности Росатома на внутреннем и международном рынках необходимо снижать стоимость и затраты времени на сооружение и наладку объектов, и одним из путей решения этой проблемы является использование расчетных методов вместо экспериментальных. Из-за сложности процессов генерации и сепарации пара в ПГ в настоящее время не существует общепризнанной методики расчетного определения СХ. Наблюдается также факт существенного разброса сепарационных характеристик конструктивно одинаковых ПГ, работающих в одинаковых условиях, причины которого не вполне ясны [1].

В данной работе проверяется предположение, что одной из причин разброса СХ ПГ могут быть погрешности в определении основных факторов, влияющих на СХ. На кафедре АСУ ТП МЭИ предложена расчетно-экспериментальная методика определения двухмерной СХ [2], в соответствии с которой СХ моделируется функцией двух переменных:

$$\omega\alpha(d, h) = \frac{\alpha(d)}{b(d) + h} + c(d), \quad (1)$$

где ω — влажность насыщенного пара, %; h — массовый уровень котловой воды.

Выполнена оценка погрешностей измерения относительной паровой нагрузки d и уровня h . Показано, что погрешность косвенного измерения паровой нагрузки ПГ d вносит основной вклад в погрешность определения влажности ω , а следовательно, и в разброс СХ.

Литература

1. **Парчевский В.М., Гурьянова В.В.** Расчет и моделирование сепарационной характеристики парогенератора АЭС с ВВЭР-1000. [Электронный ресурс]. URL: [//www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2015/autorun/index-ru.html](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2015/autorun/index-ru.html)

2. **Гурьянова В.В., Парчевский В.М.** Двухмерная сепарационная характеристика парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Сб. трудов 17-й меж. конф. молодых специалистов по ядерн. энерг. установкам. Секция 3. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, 2015.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСР С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ, АВТОНАСТРОЙКОЙ И ПРЕДИКТОРОМ СМИТА

Повышение качества регулирования — актуальная проблема, особенно для инерционных объектов. Один из возможных способов его повышения связан с применением предиктора Смита. Так как в его состав входит модель объекта, введем в АСР блок для её оперативного определения.

Рассматривается АСР с ПИД-регулятором, алгоритмом автоматической настройки (АНР-1) [1] и предиктором Смита. АНР-1 вычисляет параметры модели объекта, по ним — параметры настройки ПИД-регулятора. Расчёт ведется с использованием математической модели объекта вида

$$W_{ob}(p) = \frac{K_{ob} \cdot \exp(-p \cdot \tau)}{(T1 \cdot p + 1) \cdot (T2 \cdot p + 1)} = \frac{K_{ob} \cdot \exp(-\beta \cdot T1 \cdot p)}{(T1 \cdot p + 1) \cdot (n \cdot T1 \cdot p + 1)},$$

где $\beta = \tau/T1$; $n = T2/T1$. Рассматриваются различные варианты параметров β и n . В АСР используется ПИД-закон с демпфером второго порядка при дифференциальной составляющей. Примеры переходных процессов приведены на рис. 1. При изменении задания в АСР с предиктором Смита уменьшает колебательность переходного процесса (рис. 1а). При возмущении на вход объекта незначительно увеличивается динамическое отклонение регулируемой величины (рис. 1б). Можно сделать вывод, что АСР с предиктором Смита для тепловых объектов применима, при этом наиболее эффективна, если задание АСР часто меняется.

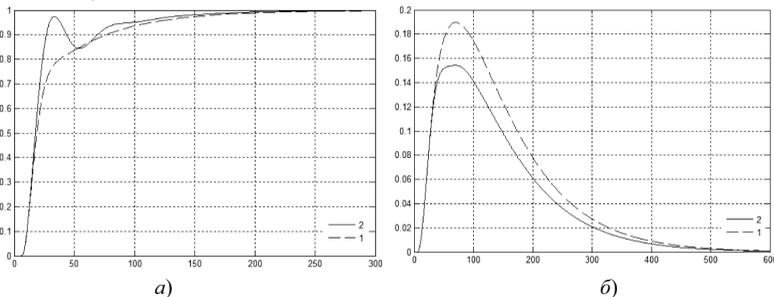


Рис. 1. Переходные процессы в АСР с предиктором Смита при изменении задания и при возмущении на вход объекта

Литература

1. Кузицин В.Ф., Царёв В.С. Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное воздействие и в режиме автоколебаний. // Теплоэнергетика. 2014. № 4. С. 35—44.

Д.С. Черкасов, студ.; рук. В.А. Менделеевич, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ХИМЦЕХА ТЭЦ-21

Основной задачей химического цеха станции является обеспечение нужного качества используемой воды, а также минимизация сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду [1].

Для решения этой задачи предлагается применение в качестве предочистки и первой ступени обессоливания мембранных технологий ультрафильтрации и обратного осмоса [2] и автоматизация технологических процессов водоподготовки на базе управляющих контроллеров. Данные контроллеры входят в состав АСУ ТП ПТК "Саргон".

На базе ПТК "Саргон" можно реализовать как распределенную (рис.1), так и централизованную АСУ ТП. Однако выбор той или иной системы зависит от множества факторов. Поэтому был проведен анализ обоих вариантов и определены как положительные, так и отрицательные стороны каждого. Учитывались такие критерии, как сложность технической реализации, экономический эффект от внедрения, возможность изменения структуры АСУ ТП в будущем, надежность системы и ремонтопригодность [3].

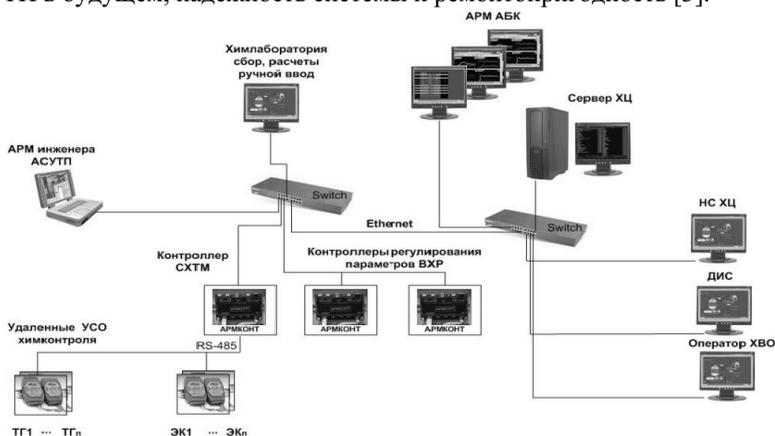


Рис. 2. Пример распределенной АСУ ТП химцеха

Литература

1. Кострикин Ю.М., Мешерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Беликова С.Е. Водоподготовка: Справочник. М.: Аква-Терм, 2007.
3. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП. Методическое пособие. М.: Издательство Дэн, 2009.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В БАРАБАНЕ КОТЛА ТРЕХИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ КОМПЕНСАТОРОВ

АСР уровня в барабане котла (регулятор питания) является одной из самых ответственных систем регулирования. Обычно в АСР питания используют трехимпульсную схему [1], в которой реализован принцип комбинированного регулирования: по возмущению — при изменении расхода пара и по отклонению — при изменении уровня воды в барабане котла или расхода питательной воды. При регулировании по возмущению используется специальное устройство, называемое компенсатором. В работе рассмотрено влияние различных видов компенсаторов на качество работы АСР.

В первом варианте рассмотрена система без компенсации. Во втором варианте рассмотрено применение компенсатора, представляющего из себя П-звена, что соответствует обычной трехимпульсной схеме. В третьем варианте рассмотрено применение сложного компенсатора. Для этого из условия абсолютной инвариантности системы получена передаточная функция идеального компенсатора для возмущения по расходу пара. посредством максимального приближения к КЧХ идеального компенсатора выбрана структура и получены параметры сложного компенсатора, содержащего статическую и динамическую части.

Анализ указанных вариантов АСР показал, что использование компенсации является необходимым. При сравнении простого и сложного компенсаторов можно заключить, что при одинаковом времени компенсации сложный компенсатор позволяет обеспечить меньшее динамическое отклонение уровня. Однако решение по выбору между простым и сложным компенсатором следует принимать в процессе наладки реальной системы с учетом влияния различных нелинейностей технических средств автоматизации и условий эксплуатации.

Литература

1. **Плетнёв Г.П.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Направление
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

Научный руководитель направления —

директор ЭнМИ, к.т.н.,
профессор С.А. Серков

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИГАТЕЛИ

Председатель секции — директор ЭнМИ к.т.н., профессор
С.А. Серков

Секретарь секции — к.т.н., доцент А.И. Лебедева

Е.Н. Вахрамеев, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА С КОТЛОМ Е-210-13,8-560БТ

Россия обладает крупнейшими залежами бурого угля в мире. Большая часть этих запасов сосредоточена в Канско-Ачинском бассейне. Уголь там добывается дешевым открытым способом, и его выгодно сжигать даже в европейской части России. Поэтому проектирование котельных установок (КУ), работающих на бурых углях и отвечающих современным требованиям, очень актуально.

В настоящей работе проведено эскизное проектирование КУ с котлом Е-210-13,8-560БТ, сжигающим березовский уголь марки Б2 Канско-Ачинского бассейна. К объекту проектирования традиционно предъявляются требования экономичности, взрывобезопасности, надежности, технологичности, ремонтпригодности и экологичности.

Топливо высокорекреакционное ($V^{daf} = 48\%$), поэтому потери от механического недожога небольшие $q_4 = 0,5\%$. Решено было использовать топку с твердым шлакоудалением. Теплота сгорания низкая ($Q_i^r = 15,659$ МДж/кг). Но влажность на рабочую массу достаточно велика ($W^r = 33\%$), и рекомендуемая температура уходящих газов высокая ($\vartheta_{yx} = 150^\circ\text{C}$). Такие значения Q_i^r и ϑ_{yx} приводят к росту потерь с уходящими газами q_2 . Поэтому КПД котла чуть более 92%. Полный расход топлива на котел 36,461 т/ч.

Березовский уголь относится к IV группе взрывоопасности (весьма опасный) и является сильношлакующим топливом. Для повышения взрывобезопасности пылесистем и снижения вероятности шлакования экранов топki было принято решение об использовании газозвдушной сушки. Повышению взрывобезопасности способствует также выбор температуры за мельницами-вентиляторами в соответствии с требованиями регламентирующих документов и установка взрывных клапанов в пылесистемах.

Бесшлаковочная работа экранов топки и устойчивое горение топлива на минимальной нагрузке 50 % обеспечивается. Это было проверено специальными расчетами. Полурadiационные ширмы и ступени пароперегревателя должны работать в бесшлаковочном режиме, потому что температуры перед ними выбирались по нормативным рекомендациям.

При разработке котла учитывались технологические возможности ОАО «ПМЗ-ЗИО», предусмотрены ремонтные зоны внутри и вне котла. Экологические требования удовлетворяются за счет использования внутритопочных мероприятий.

Компоновка котла П-образная. Восемь прямооточных горелок скомпонованы в топке тангенциально, в два яруса.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ SMART СИСТЕМ ТЕПЛО- И ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Сегодня эксплуатируемое в системах тепло- и водоснабжения насосное оборудование, работая в достаточно широких диапазонах подач, имеет довольно низкие энергетические показатели, морально и физически устаревает [1]. В последние годы актуальность приобретают вопросы, связанные как с модернизацией отдельных узлов, так и гидросистемы в целом.

Отмечаются тенденции к интеллектуализации и автоматизации данных систем, непременным атрибутом которых становятся частотные преобразователи, позволяющие снизить энергозатраты. Применение нетрадиционных методик проектирования лопастной системы, в частности с переменным шагом, также позволяет обеспечить расширение рабочей зоны и повышение интегрального КПД [2]. Для модернизированной модели насоса КМ 65-50-160 с расширенной зоной экономичной эксплуатации была проведена серия виртуальных экспериментов в разных частотных режимах (рис.1) с применением пакета программ ANSYS.

Результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения насосного оборудования, модернизированного на базе переменного шага, в Smart-системах тепло и водоснабжения.

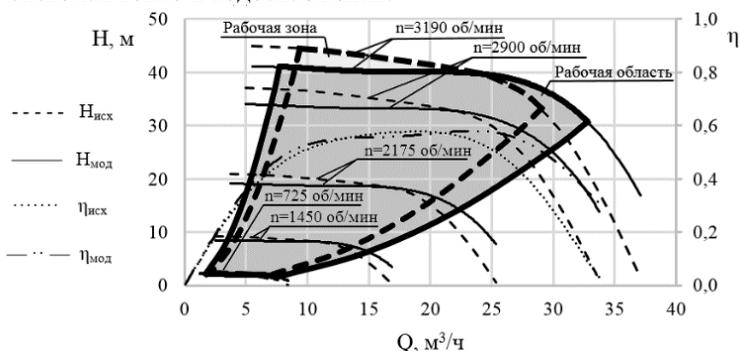


Рис. 1. Расширение рабочей зоны модернизированного насоса КМ 65-50-160

Литература

1. Вихлянцев А.А., Волков А.В. К вопросу о проектировании насосного оборудования для Smart-систем водоснабжения // Молодёжный научно-технический вестник. 2015. № 9.
2. Волков А.В., Хованов Г.П., Парыгин А.Г., Давыдов А.И. О возможностях расширения эффективной рабочей зоны центробежного насоса в системах тепло- и водоснабжения // Энергетик. 2012. № 3.

МИНИ-ТЭЦ НА БАЗЕ ТУРБИНЫ КИНАСТ

Все больше на сегодняшний день в различных областях техники находят широкое применение паровые микротурбины. Турбины данного типа способны свести к минимуму потери энергии и являются ярким примером рационального использования ресурсов, позволяя получить дополнительную электрическую и тепловую энергию, которую можно использовать не только для покрытия собственных нужд предприятия, а также и для отдельных жилых домов.

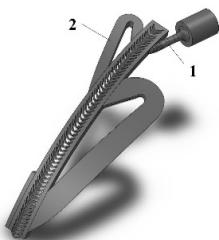


Рис. 1. Схема потока пара в турбине «Кинаст»

Использование турбин типа Кинаст позволяет утилизировать малые объемные расходы избыточного пара парового котла и, например, переоборудовать котельную под мини-ТЭЦ. С этой целью выполнена подробная проработка тепловой схемы. Проведена оценка технических характеристик теплового оборудования и энергетических показателей энергоблока.

Отличительной особенностью турбины Кинаст является то, что конструкция ступени скорости выполняется с одним рядом рабочих лопаток. На рис. 1 представлена схема течения пара в турбине Кинаст. Пар, расширившийся в сопле 1, направляется в каналы рабочих лопаток и при выходе из них поступает в поворотный канал 2, где направление потока меняется. Из поворотного канала пар вновь поступает в рабочие лопатки. Углы наклона сопел и поворотных камер располагают так, чтобы направление выходной скорости пара соответствовало входному углу лопаток [1].

Проведенный детальный расчет проточной части турбины Кинаст показал, что относительный лопаточный КПД составил 80,4%, относительный внутренний КПД равен 65,7%, а внутренняя мощность — 21,5 кВт. Большая разница между относительным внутренним и относительным лопаточным КПД объясняется повышенным значением потерь от утечек, а также вентиляционной составляющей потерь от парциальности.

На основании полученных аэродинамических и геометрических данных разработана 3D модель как проточной части, так и самой турбины, которая показала ее компактность, надежность, простоту в изготовлении и эксплуатации.

Литература

1. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкция турбин: 3-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. 320 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В настоящее время при модернизации концевых уплотнений паровых турбин применяются прямооточные уплотнения с сотовыми статорными частями и проточкой втулок ротора под волнообразные гребни. Основной причиной такой модернизации, проведенной на ТЭЦ-23, ТЭЦ-25 и ТЭЦ-26 ПАО «Мосэнерго», является невозможность выдержать относительное укорочение роторов ЦНД и ЦСД-2 ТПУ Т-250/300-23,5 в допустимых пределах во время аварийных остановов, что приводит к задеваниям в уплотнениях. При этом экономичность от такой замены признается положительной, но оценивается только по косвенным факторам, таким как нормализация работы эжекторов и снижение обводнения масла, что не дает достоверной оценки экономичности такой реконструкции.

При этом, очевидно, что сотовые прямооточные уплотнения, применяемые для такой замены (рис. 1), и имеющие весьма малый радиальный зазор, будут подвержены задеваниям как в радиальном, так и в осевом направлениях на любых переходных режимах. При этом их реальные расходные характеристики будут существенно хуже штатных уплотнений.

Как показали проведенные исследования расходных характеристик уплотнений, показанных на рис. 2 (3 — обычное трехгребенчатое прямооточное уплотнение, 3м — модернизированное концевое уплотнение с «волнистым» ротором), расходные характеристики стандартных прямооточных уплотнений оказываются лучше, чем у новых с «волнистым» ротором.

В области малых зазоров ($\delta = 0,3$ мм) расход через них меньше на 4%, а с ростом δ до 2 мм эта разница увеличивается до 6%. Понятно, что эта разница по сравнению со штатными ступенчатыми уплотнениями будет еще больше. Следовательно, из соображений экономичности не следует проводить описанную выше замену концевых уплотнений.

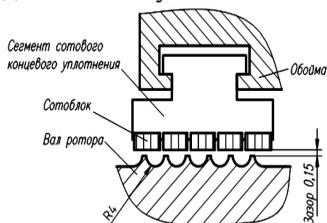


Рис. 1. Вид ячейки модернизированных концевых уплотнений ТЭЦ-23

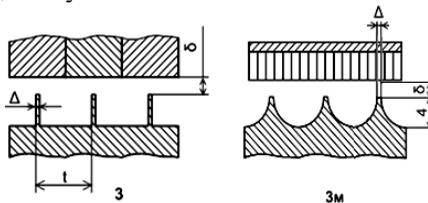


Рис. 2. Типы исследованных уплотнений

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ И МИКРОЭНЕРГЕТИКИ

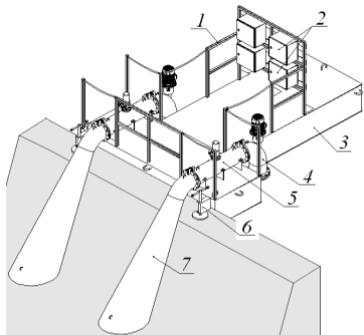


Рис. 1. Общий вид ГЭУ:

1 — ограждение; 2 — шкафы управления гидроагрегатом; 3 — понтон; 4 — гидроагрегат; 5 — патрубок; 6 — опора; 7 — диффузорный отвод

В проточной части расположена обратимая гидромашинна осевого типа. Отводящая труба в виде сифона образована корпусом гидроагрегата, патрубком 5, диффузорным отводом 7 и исполняет роль разгонного устройства. Понтон в качестве платформы для размещения гидроагрегатов позволяет уйти от создания бетонных конструкций плотины и использовать гидроэнергетическую установку на готовом напорном фронте. Это позволяет избежать паводковой аварийности гидроагрегатов — проблемы ГЭС стационарного типа [3]. Модульность конструкции позволяет обеспечить увеличение мощности установки путём размещения нескольких гидроагрегатов на платформе. Благодаря плавучему исполнению ГЭУ мобильна и эффективна к транспортировке.

Объект может быть востребован для водоканалов и водоочистных сооружений, тепловых электростанций, разнообразных систем охлаждения со сбросом воды.

Литература

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Энергетика в современном мире. Интеллект, 2011.
2. **Parygin A.G., Volkov A.V., Ryzhenkov A.V.** Commentary on the Efficiency of Selected Structural Designs of Low Head Micro Hydraulic Power Plants // Modern Applied Science, Vol. 9, No 4, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n4p116>
3. **Волков А.В., Дружинин А.А.** К вопросу о проектировании понтонной низконапорной микроГЭС // Молодежный Научно-Технический Вестник, 2015. №9. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/801672.html>.

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

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ В ГТУ

Начальная температура газа перед газовой турбиной T_c — важнейшая характеристика газотурбинных установок (ГТУ), определяющая в значительной степени экономические, габаритные показатели и стоимость установки. Однако начальная температура газа не входит в число показателей, которые сообщаются в информационных материалах большинства фирм-производителей ГТУ. Метод определения температуры по нормам ISO, как показывают расчеты, дает лишь малое представление о значении истинной температуры газов перед газовой турбиной.

В работе предложен расчетный подход к определению истинных температур газа в проточной части газовой турбины, основанный на методике теплового расчета охлаждаемой турбины [1]. В качестве исходных уравнений приняты уравнение теплового баланса камеры сгорания и уравнение смешения потоков в камере сгорания. Также для расчета использованы результаты приемных испытаний ГТУ по нормам ISO [2] и статистические зависимости требуемых расходов охлаждающего воздуха от температур газа и металла лопаток.

С использованием разработанной компьютерной программы выполнены подробные численные расчеты для нескольких эксплуатируемых установок фирмы «Mitsubishi» с учетом их конструктивных особенностей. Результаты расчетов температур сопоставлены с экспериментальными данными и характеристиками ГТУ. Примеры расчетов показывают, что предлагаемая методика позволяет определить начальную температуру газа с погрешностью около 15-20°C, при этом погрешность вычисления начальной температуры на основе подходов, изложенных в нормах ISO, может превышать 150-200°C для высокотемпературных ГТУ.

Предлагаемая методика определения истинной температуры газов T_c углубляет понимание процессов в охлаждаемых газовых турбинах и может быть ценным дополнением к существующим нормам ISO.

Литература

1. **Костюк А.Г., Карпунин А.П.** Исследование влияния параметров ГТУ на ее характеристики с учетом дополнительных потерь в охлаждаемой газовой турбине // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 33—38.
2. **Ольховский Г.Г. и др.** Тепловые испытания газотурбинной установки 9FB фирмы «Дженерал электрик» // Теплоэнергетика. 2013. № 9. С. 3—8.

*Н.А. Коренев, Д.А. Трохин, студенты;
рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-13-40 ДЛЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА НА БИОМАССЕ С КОТЛАМИ ОАО «ЗКО»

В современном мире всё больше появляется необходимость само обеспечения производств электрической и тепловой энергией. Проектировка энергокомплексов с маломощными турбинами и котлами, работающими на сельскохозяйственных отходах, позволяют обеспечить многие производства. Данные энергокомплексы также являются примером рационального использования биомасс, что позволяет получить дополнительную электрическую и тепловую энергию.

Целью работы данной работы является разработка паровой турбины для совместной работы с котлами АО «ЗКО», позволяющими утилизировать сельскохозяйственные отходы.

Отличительной особенностью турбины К-13-40 является быстрходность, что позволяет отказаться от выполнения первой ступени паровой турбины двухвенечной. Принятое решение позволило выполнить первые ступени давления паровой турбины с умеренными высотами лопаток при полном подводе пара, а также обеспечить для этих ступеней условие стремления u/c_f к его оптимальному значению, а следовательно, и стремление эффективности всех ступеней давления к максимальному значению (кроме последней ступени поскольку выбранный для нее теплоперепад обеспечивает условие ее эффективной работы на переменных режимах [1]). Резкое же увеличение объемного пропуска пара через последние ступени при неизменном корневом диаметре привело бы к такому же резкому росту высот лопаток последних ступеней. Поэтому для обеспечения плавного меридионального обвода проточной части паровой турбины выбран закон повышения по потоку корневого диаметра [2].

Проведенный детальный расчет проточной части турбины К-13-40 показал, что ее внутренний относительный КПД равен 84,3 %, а внутренняя мощность турбины составляет 14,08 МВт.

На основании полученных аэродинамических и геометрических данных выполнено 3D профилирование лопаточного аппарата последней ступени в программе Numesa. Также были проведены вибрационный расчет и отстройка рабочих лопаток последней ступени от резонанса.

Литература

1. **А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин.** Паровые и газовые турбины для электростанций: под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.
2. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. — 5-е изд., доп. и подгот. к печати проф. Трояновским. М.: Энергия, 1976. 368 с.

И.Б. Лазарев, студ.; рук. Т.В. Богомолова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ КОНИЧЕСКОГО ДИФФУЗОРА В ПАКЕТЕ FLUENT

Выходные патрубки современных мощных паровых турбин являются сложными устройствами, от эффективности которых зависит не только КПД паровой турбины, но и надежность ее эксплуатации. Теперь стало возможным моделировать течение в такой трубке с помощью газодинамических пакетов [1]. Первая стадия этой работы — сопоставление результатов расчета конического диффузора в пакете Fluent с расчетами по методу С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьева [2], а также с экспериментальными исследованиями [3] приведена ниже.

Для расчета был выбран диффузор, геометрическая форма которого была полностью идентична испытанному диффузору: угол раскрытия 6° и степень расширения $n = 2$. Число $Re_d = \rho_1 U_1 d_1 / \mu$ изменялось в пределах $3 \cdot 10^4 \leq Re_d \leq 10^6$, но только в результате изменения скорости потока. Относительная скорость $\lambda = U/a_{кр}$ находилась в диапазоне $0,1—0,8$. При решении задачи в пакете Fluent использовалась структурированная сетка с числом ячеек 35000. Была принята *sst*-модель турбулентности для возможности фиксации отрывных явлений на стенках диффузора. Сравнение результатов численного эксперимента в пакете Fluent и опытными данными [3] показало хорошее совпадение во всем исследованном интервале, так же как и сопоставление с результатами расчетов данного диффузора по методу асимптотических пограничных слоев [2].

Дальнейшее развитие исследований заключается в применении пакета Fluent к расчету осевого осесимметричного диффузора за последней ступенью паровой турбины одновальной парогазовой установки.

Литература

1. **Сергиевский Э.Д., Овчинников Е.В., Крылов А.Н.** Применение комплекса численного моделирования FLUENT для задач промышленной теплоэнергетики. М.: Издательство МЭИ, 2006.
2. **Богомолова Т.В.** Исследование газодинамики и тепломассообмена внутренних течений в энергетических установках. Автореф.т докт.... диссертации. М., 2000.
3. **Идельчик И.Е., Гинзбург Я.Л.** О механизме влияния условий входа на сопротивление диффузоров // ИФЖ. 1969.

*А.Ю. Лампель, студ.; Ю.С. Чудопал, асп.;
рук. П.В. Росляков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПГУ

В настоящее время самыми эффективными серийными энергетическими установками являются парогазовые установки (ПГУ) с коэффициентом полезного действия (КПД) до 60 %. Одним из основных элементов этих установок является котел-утилизатор (КУ), в котором вырабатывается пар для паротурбинной установки (ПТУ). Современные КУ, используемые в действующих энергетических ПГУ, как правило, имеют два контура докритических параметров с установкой различных теплообменных аппаратов на выходе для снижения температуры уходящих газов (ϑ_{yx}) и повышения коэффициента использования теплоты (КИТ). КИТ данных установок составляет 82—84 % [1].

Известно, что увеличение параметров рабочего тела увеличивает эффективность работы всей энергетической установки. В связи с вводом в последние годы высокотемпературных газотурбинных установок (ГТУ) с температурой отходящих газов 580—620 °С, появилась возможность повышения параметров пара в КУ до сверхкритического давления. Эта задача является актуальной как с точки зрения повышения эффективности работы энергетической установки, так и с точки зрения экологической безопасности, в связи с тем, что ПГУ характеризуются пониженными удельными выбросами оксидов азота (NO_x).

Переход на сверхкритические параметры (СКП) в КУ требует решения целого комплекса проблем: оптимизации тепловой схемы ПТУ, поддержание требуемых параметров рабочего тела в рабочем диапазоне нагрузок, обеспечение надежности работы контуров на пусковых и переходных режимах.

Задачей данной работы является оптимизация принципиальной тепловой схемы КУ на сверхкритические параметры пара, определение параметров и расходов пара в контурах КУ, возможности установки дополнительного теплообменника на выходе из КУ для снижения температуры уходящих газов, а также КИТ для КУ.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. М.: Издательство МЭИ, 2002. 584 с.

Р.С. Маслов, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВОДОГРЕЙНЫЙ КОТЕЛ КВ-116-150, СЖИГАЮЩИЙ ОТХОДЫ ДЕРЕВООБРАБОТКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

В настоящее время активно ведется поиск альтернативных источников энергии, которые могли бы заменить истощающиеся запасы угля и природного газа. Для получения тепловой и электрической энергии на деревообрабатывающих предприятиях выгодно устанавливать котлы, сжигающие древесную щепу и опилки. Эти котлы смогут ликвидировать проблему хранения древесных отходов и обеспечивать предприятие водой для собственных нужд.

Новизной данной работы является использование технологии сжигания топлива в кипящем слое на водогрейном котле. Эта технология сжигания наименее требовательна к составу топлива, что дает значительное преимущество, связанное с различными сортами и качествами древесины. Также сжигание в кипящем слое позволит использовать резервные виды топлива.

Работа посвящена проработке конструкции водогрейного котла, реализующего сжигание топлива в кипящем слое для высокоэффективной ТЭЦ [1]. Преимуществами этого котла являются отсутствие сушильно-мельничной системы, и универсальность по топливу.

По ходу разработки конструкции автором выполнены расчет КПД котла и расхода топлива на котел, воздухораспределительной решетки, расчет топки, и тепловой расчет. Расчет поверхностей нагрева производился в Boiler Designer.

В процессе проектирования были приняты следующие основные конструктивные решения:

- башенная конструкция котла;
- суженный газоход;
- поверхности нагрева являются унифицированными;
- поверхности нагрева крепятся к трубам экранов топки без применения коллекторов.

Характеристики водогрейного котла:

- Тепловая производительность — 1235 т/ч;
- Давление воды в контуре — 1,6 МПа;
- Температура воды на выходе из котла — 150°C;
- Температура воды на входе в котел — 70 °С.

Литература

1. **Влияние** конденсационного утилизатора на работу паровых и водогрейных газовых котлов / И.Л. Ионкин, А.В. Рагуткин, П.В. Росляков и др. // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 44.

Д.В. Миганова, студ.; рук. С.А. Серков, к.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОСЕВАЯ ПАРОВАЯ ТУРБИНА ДЛЯ АВТОНОМНОЙ МИКРОТЭЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ 50—100 кВт

Одним из способов укрепления национальной безопасности и энергетической независимости России является создание модельного ряда автономных, доступных по цене энергетических установок (ЭУ) малой мощности (50–100 кВт), работающих на местном низкореактивном топливе, включая возобновляемое биотопливо, с целью освоения Сибири, Крайнего Севера и других регионов, не охваченных централизованным электро- и теплоснабжением [1].

Тепловая схема ЭУ бездеаэрационного типа не требует квалифицированного эксплуатационного и ремонтного персонала. Паровая турбина, $n = 60\,000$ об/мин. Опоры воздушные лепестковые. Состоит как вариант из осевых ступеней. Подвергается в общем случае 3D профилированию. Ротор цельный, изготавливается на станке с ЧПУ. Замена ротора — по наработке. Простая современная силовая электроника позволяет отказаться от ненадежного редуктора. Температура ниже 450 °С, обеспечивает надежность и невысокую стоимость ремонтных расходов. Топливо — биологическое, возобновляемое, дешевое — дрова, валежник, обрезки дерева, гранулы из указанных материалов и т.п.

Произведены расчёты тепловой схемы при различных параметрах. Был выбран оптимальный вариант из ступеней осевого типа. Проведены расчёты проточной части паровой турбины, в том числе на прочность, включающие в себя: расчет на растяжение, изгиб, вибрационную надёжность рабочей лопатки, прочность диска и оценка собственной частоты ротора. Оптимальной оказывается, в частности, двухступенчатый вариант с приемлемой высотой лопаток, невысокими числами Маха, так что можно избежать профилирования по высоте и применить стандартные профили МЭИ.

Полученные данные дают в дальнейшем возможность произвести наглядный и более детальный расчет, основанный на использовании современных программ таких как SolidWorks, ANSYS.

Литература

1. **Распределенная** генерация тепла и электричества / С.А. Серков, В.Г. Грибин и др. // *Neftegaz.ru* № 1, 2. 2015. С. 20—25.

Д.В. Настека, асп.; рук. А.И. Лебедева, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В настоящее время в отечественной энергетике одной из наиболее актуальных проблем является проблема увеличения межремонтного периода и ресурса паровых турбин.

Рабочие лопатки (РЛ) последних ступеней ЦНД паровых турбин эксплуатируются в условиях воздействия статических и динамических нагрузок при наличии эрозионного повреждения вследствие каплеударного воздействия потока влажного пара. В процессе эксплуатации турбины возникает эрозионный износ входных кромок РЛ этих ступеней. При этом ухудшается аэродинамика обтекания пера РЛ, снижается КПД ступени, а также возможно возникновение трещин в пере РЛ, вызывающих их разрушение. Из-за высокой стоимости новых РЛ последних ступеней ЦНД экономически наиболее целесообразно восстанавливать поврежденную входную кромку РЛ. Восстановление эрозионно поврежденных РЛ проводится при использовании различных технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала, электроискрового легирования поверхностного слоя входной кромки РЛ, нанесения ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки, а также припайки стеллитовых пластин.

Поскольку основными материалами, используемыми для РЛ, являются стали мартенситного класса марок 12Х13, 20Х13, 15Х11МФ, ЭИ-961 существенным условием успешного проведения операции восстановления РЛ является минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения возможного формирования зон подкалочных структур. Такое возможно при использовании технологий лазерной наплавки [1,2].

Лазерная наплавка заключается в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Вследствие того, что основа подплавляется минимально, свойства покрытия главным образом зависят от свойств присадочного материала. Метод лазерной наплавки является перспективным ремонтным методом за счет своих уникальных свойств.

Литература

1. **Третьяков Р.С.** Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов: дис. ... канд. тех. наук. М., 2014. 158 с.
2. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрюв А.И.** Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 664 с.

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

ПГУ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОТЛОМ И ПАРОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ КОМПРЕССОРА

В настоящее время существует очень широкий спектр компоновки оборудования ПГУ и при их массовом строительстве наряду с экономичностью важнейшим показателем становится величина удельных капитальных затрат и удельной металлоемкости этих установок [1].

В данной работе рассматриваются следующие тепловые схемы: ПГУ с полным паротурбинным приводом компрессора, ПГУ с паротурбинным приводом ступеней низкого давления компрессора, ПГУ с дополнительным энергетическим котлом.

На основании полученных результатов технико-экономического расчета можно сделать следующие выводы:

1. При переходе к полному паротурбинному приводу компрессора в схеме ПГУ на 10—20 % увеличивается ее мощность при снижении КПД на 0,5—1,5 %.

2. Переход к паротурбинному приводу компрессора позволяет либо уменьшить металлоёмкость за счет увеличения частоты вращения ротора паровой турбины, либо резко увеличить предельную производительность компрессора за счет снижения частоты вращения ротора паровой турбины.

3. Выделение паротурбокомпрессора в отдельный блок позволяет при сохранении линейной компоновки основного силового оборудования ПГУ, характерного для одновальных установок, резко увеличить предельную мощность ПГУ, работающих на базе одной ГТУ.

4. Показана целесообразность использования в одновальных ПГУ двухвального воздушного компрессора с соединением ступеней низкого давления только с утилизационной паровой турбиной, что облегчает запуск ПГУ, исключает возникновение помпажа в компрессоре и позволяет увеличить его предельную производительность за счет снижения частоты вращения ротора паровой турбины, связанной только с ступенями низкого давления.

5. Рассмотренная новая схема гибридной ПГУ с дополнительным энергетическим котлом позволяет при надстройке существующих паротурбинных блоков ТЭС высокотемпературными ПГУ заметно снизить стоимость модернизации.

Литература

1. Зарянкин А.Е., Магер А.С., Роголёв А.Н. Двухвальные парогазовые установки высокой мощности на базе одновальных ПГУ // Газотурбинные технологии. 2012. № 4.

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

ТУРБОДЕТАНДЕРНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ НА ТЭС

На ТЭС, использующих в качестве топлива природный газ, на газораспределительном пункте давление газа дросселируется с 1,2 МПа до 0,3 МПа. Стремление использовать теряемый в процессе дросселирования перепад давления привело к созданию турбодетандерных установок, где вместо дросселирования газ расширяется до нужного давления в турбодетандере, вырабатывая дополнительную электроэнергию. При этом, однако, к энергетическому котлу газ необходимо подводить при плюсовых температурах. В этой связи приходится подогревать газ от внешнего источника теплоты. На ТЭС в ряде случаев для этой цели используется пар, отводимый из проточной части турбины, что, естественно, снижает ее мощность. То есть в термодинамическом плане турбодетандерная установка работает в режиме теплового трансформатора и максимальная эффективность указанных установок достигается в случае, если для нагрева газа используется «бросовая» теплота [1].

Выполнено эскизное проектирование турбодетандера и специального подогревателя газа, использующего теплоту уходящей циркуляционной воды, что позволяет при расходе газа $G = 153,5$ кг/с не только дополнительно получить 19 МВт электрической мощности, но и на эту величину снизить тепловое загрязнение атмосферы. Одновременно спроектирована и газотурбинная установка с турбодетандерным приводом компрессора (рис. 1).



Рис. 1. ГТУ с турбодетандерным приводом компрессора

Литература

1. **Турбодетандерная** система утилизации теплоты циркуляционной воды на конденсационных блоках паровых турбин ТЭС / А.Е. Зарянкин, Г.Н. Курдюкова, А.Н. Роголёв и др. // Тяжелое машиностроение. 2015. № 5. С. 15—20.

*Т. Падашмоганло, асп.; И.П. Лавырев, студ.;
рук. А.Е. Зарянкин, проф. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЖЕКТОРНЫХ ТРОЙНИКОВ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Тройники, обеспечивающие слияние или разделение потоков, являются элементами сложных трубопроводных систем. В аэродинамическом плане это источники очень больших возмущений и серьезно увеличивают гидравлическое сопротивление прямых проходов при слиянии двух потоков, встречающихся под прямым углом.

Для снижения отрицательных последствий, вносимых в поток стандартными тройниками, предлагается их новая конструкция, изображенная на рис. 1.

В данном случае внутри стандартного тройника, состоящего из основного участка трубы 1 и бокового подвода 2, устанавливается суживающееся сопло 3, проходная площадь которого в 2 раза меньше проходной площади трубы 1 прямого прохода. В результате исключается прямой контакт рабочей среды, подводимой по боковому подводу 2, с потоком, который идет по прямому проходу, а струя, выходящая из суживающегося сопла 3 с увеличенной скоростью, обеспечивает эжекцию среды, подводимой к основному трубопроводу через боковой проход.

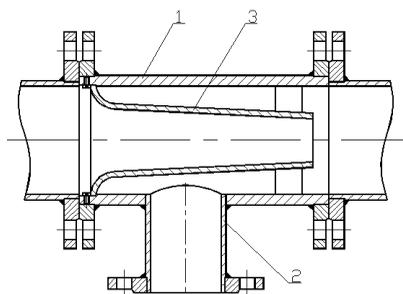


Рис. 1. Эжекторный тройник

Для сравнительной оценки предлагаемого нового тройника было проведено математическое моделирование течения как в стандартном, так и в новом тройнике, результаты которого и представлены в настоящем докладе. Кроме того, для сравнения результатов математического моделирования с прямым физическим экспериментом была спроектирована специальная установка, позволяющая получить все основные характеристики сравниваемых тройников.

А.Ю. Ревенко, студ.; рук-ли О.М. Митрохова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
М.А. Бардина, инж. (ГТЭС-3, г. Салехард)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА Т-250/300-23,5

Рост потребности в электроэнергии обуславливает стремление к повышению эффективности современных ТЭС. При этом важную роль играет конструкция оборудования, установленного на этих электростанциях. Повышение экономичности и надежности уже существующих турбин, таких как Т-250/300-23,5 является актуальной и сложной проблемой.

В целях повышения надежности работы турбины рассматриваются варианты изменения способа парораспределения. Турбина Т-250/300-23,5 имеет сопловое парораспределение, которое не обладает высокой надежностью из-за частичного подвода пара по окружности и, вследствие неравномерности распределения пара, сопровождается повышением нагрузок на регулируемую ступень [1]. Для проверки целесообразности замены парораспределения были проведены расчеты регулирующей ступени на переменном режиме ($G_n/G_0 = 0,1 \dots 1$) с последующим расчетом нерегулируемых ступеней ЦВД, расчет переменного режима для ЦВД при дроссельном парораспределении на этих же частичных режимах и расчет при обводном парораспределении в сочетании с дроссельным.

По результатам детального расчета номинального и переменного режима ЦВД при сопловом и дроссельном парораспределении имеем выигрыш в КПД на переменном и номинальном режиме при дроссельном парораспределении. Это можно объяснить сильным снижением КПД ЦВД при сопловом парораспределении за счет КПД регулирующей ступени, а также тем, что потери от дросселирования не сказываются на КПД ЦВД, а все изменения коснутся предоборных последних ступеней ЦСД.

Для проектирования обводного парораспределения с желанием достичь увеличения мощности и уменьшения потерь от дросселирования необходимо знать режим нагрузки турбины, график её работ и область режимов, в которой она работает больше времени [2]. Оптимизировать обводное парораспределение необходимо под график работы турбины (выбрать максимальный расход через обведенную группу и соответственно саму группу обвода, спроектировать последующие ступени на максимальный КПД при более частых режимах работы и т.д.).

Литература

1. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е. Паровые и газовые турбины для электростанций: под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.
2. Щегляев А.В. Паровые турбины. — 5-е изд., доп. и подгот. к печати проф. Трояновским. М.: Энергия, 1976. 368 с.

Е.А. Рябцев, асп.; рук. Г.М. Моргунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДВОДЯЩЕГО И ОТВОДЯЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ПОЛИРЯДНОГО НАСОСА

Одним из главных вопросов при проектировании гидромашин (в частности, полирядных [1, 2]) является выбор подводящего и отводящего устройств. Подводящее устройство предназначено для организованного подвода жидкости к рабочему колесу с наиболее равномерной эпюрой скорости и минимальными гидравлическими потерями. В связи с уникальностью конструкции трёхрядного насоса, работающего параллельно по подаче [1, 2] была поставлена задача выбора таких подводов и отводов, обеспечивающих малые потери на разделение потока и равномерную эпюру на входе в рабочее колесо и минимизировать потери на смешивание потока за направляющим аппаратом.

В рамках расчетно-теоретического исследования подводов и отводов для модели полирядного насоса [2] были исследованы:

- короткий конфузор;
- осевой подвод с коленом (имеющий место в традиционных осевых насосах);
- бочкообразный подвод с одним боковым входом [3];
- бочкообразный подвод с двумя боковыми входами потока;
- радиально-осевые безлопаточные канальные полости.

Результаты исследования в программном комплексе ANSYS CFX показали, что наиболее оптимальные результаты по КПД и структуре потока в области входа в полирядное рабочее колесо даёт конфузор и радиально-осевые каналы. Результаты компьютерного исследования подводов и отводов для полирядного насоса схожи с результатами исследования традиционных подводов [3].

Литература

1. **Моргунов Г. М., Рябцев Е. А.** Полирядные осевые насосы с мультипланными рабочими органами // «Компрессорная техника и пневматика». 2014. № 5. С. 38—41.
2. **Купцов С. Ю., Моргунов Г. М., Рябцев Е. А.** Перспективность разработок полирядных осевых насосов и варианты их проточных частей для энергоагрегатов различного назначения. // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 5. С. 19—25.
3. **Свобода Д. Г., Жарковский А. А., Складчиков А. Н.** Влияние условий подвода на прогнозные интегральные характеристики осевого насоса с низкой быстроходностью. // Труды VI Всероссийской конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (25 — 27. 03.2014). С. 527—530.

Д.Р. Сверчков, студ.; рук. А.Д. Трухний, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ДВУХКОНТУРНАЯ ТРЕХВАЛЬНАЯ УТИЛИЗАЦИОННАЯ ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ НОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ГТУ GT13E2

Строительство мощных парогазовых установок на базе современных высокотемпературных ГТУ, работающих на природном газе, стало основным направлением наращивания установленной мощности России [1]. По текущим прогнозам Международного Энергетического агентства, состояние мировой энергетики в ближайшие годы также предопределяет ориентацию тепловой энергетики на строительство ПГУ. При этом планируется не только возведение новых блоков и станций, но и реконструкция действующих станций.

В работе проведен расчет двухконтурной трехвальной утилизационной парогазовой установки на базе последней модификации ГТУ GT13E2. Установка состоит из двух газовых турбин GT13E2 фирмы Альстом мощностью по 202,7 МВт, двух котлов-утилизаторов паропроизводительностью 89,3 кг/с и одной паротурбинной установки мощностью 173,1 МВт. Коэффициент полезного действия ПГУ составил 54,2 %, а ее суммарная мощность — 578,5 МВт.

Особенностью тепловой схемы ПГУ является применение в ней деаэратора, встроенного в барабан низкого давления котла-утилизатора и использующего для нагрева поступающего конденсата насыщенный пар собственного испарителя. Преимуществом такого деаэратора является исключение необходимости во внешнем источнике греющего пара и соответствующих паропроводов. Барабан, в котором происходит отделение насыщенного пара от воды и деаэрации, одновременно используется в качестве бака запаса деаэрированной питательной воды для работы контуров НД и ВД.

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 667 с.

А.Д. Смирнов, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КОТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА С КОТЛОМ Е-320-13,8-560КЖ

Важнейшей задачей является снижение доли природного газа в топливном балансе электростанций России. Поэтому проектирование котельных установок (КУ), работающих на угле и отвечающих современным требованиям, как никогда актуально.

Одним из крупнейших по запасам топлива является Кузнецкий бассейн. Поэтому в настоящей работе проведено эскизное проектирование КУ с котлом Е-320-13,8-560КЖ, сжигающим кузнецкий уголь марки Т. К объекту проектирования традиционно предъявляются требования экономичности, взрывобезопасности, надежности, технологичности, ремонтпригодности и экологичности.

Поскольку топливо низкорекреакционное ($V^{daf} = 15 \%$), для его тонкого размола используются шаровые барабанные мельницы (ШБМ), для устойчивого воспламенения и экономичного горения — топка с жидким шлакоудалением (ЖШУ), оборудованная восемью лопаточно-лопаточными горелками, скомпонованными встречно в один ярус. Температура горячего воздуха выбрана по максимуму: $t_{гв} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Все это способствует снижению механического недожога q_4 . Для снижения потерь с уходящими газами их температура и коэффициент избытка воздуха на выходе из топки приняты в соответствии с существующими требованиями.

Для взрывобезопасности пылесистем (ПС) температура за ШБМ выбиралась в соответствии с рекомендациями регламентирующих документов, предусмотрена установка взрывных клапанов.

Надежный выход жидкого шлака обеспечивается определением размеров зоны активного горения (ЗАГ), применением футеровки экранов в ЗАГ, высоким значением $t_{гв}$, а также работой всех горелок без отключения, поскольку ПС с промбункером. Надежная работа поверхностей нагрева (ПН) обусловлена правильным выбором металла труб, скоростей теплоносителей, температур в реперных точках по газовому тракту, приращений энтальпии рабочего тела в ПН.

При разработке котла учитывались технологические возможности ОАО «ПМЗ-ЗИО», предусмотрены ремонтные зоны внутри и вне котла.

Удовлетворить существующие экологические требования невозможно без установки оборудования газоочистки за котлом.

Компоновка котла П-образная, топка призматическая, открытого типа, режим работы — с уравновешенной тягой. Расчетное значение КПД порядка 92,5 %, полный расход топлива на котел 33,125 т/ч. КУ может работать в диапазоне 70—100 %, как это и требуется при ЖШУ.

А.Д. Смирнов, студ.; рук. В.М. Супранов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОТЛА ТПП-210А

В настоящее время состояние основного энергетического оборудования ТЭЦ требует реализации мероприятий по его техническому перевооружению с целью сохранения и наращивания потенциала электростанций.

Прямоточный котел ТПП-210А ОАО ТКЗ «Красный котельщик» предназначен для работы в блоке с турбиной Т-250/300 на энергоблоке ст. №9 ТЭЦ-22 филиала ОАО «Мосэнерго». Котел, сжигающий кузнецкий уголь марки Т, спроектирован в двухкорпусном симметричном исполнении и подключается к турбине по схеме «дубль-блока».

С целью повышения тепловой мощности в сочетании с требованиями улучшения экологических показателей работы был предложен проект по реконструкции котлоагрегата.

Основные требования, предъявляемые к работе реконструированного котла:

- повышение паропроизводительности до 1030 т/ч;
- увеличение температуры первичного и вторичного пара до 570 °С;
- обеспечение КПД котла при работе на угле не менее 89,4 %;
- обеспечение нормативных выбросов оксидов азота при работе на угле без подсветки газом;
- обеспечение стабильности горения топлива и надежности работы котла в целом.

Основными решениями по реконструкции котла являются:

- переход на твердое шлакоудаление с исключением пережима в топке и устройством холодной воронки;
- применение двухступенчатой схемы сжигания с ярусом третичного дутья (ОФА);
- применение тангенциальной схемы расположения низкоэмиссионных регулируемых вихревых пылегазовых горелок;
- применение горелок с турбулизаторами для снижения выбросов оксидов азота и повышения стабильности факела каждой горелки;
- применение системы селективного некаталитического восстановления оксидов азота (СНКВ);
- установка сопел пристенного дутья для реализации горизонтальной стадийности сжигания топлива и защиты экранов топки.

Принятые решения позволяют обеспечить бесшлаковочную работу топки, улучшение технико-экономических и экологических показателей работы оборудования, входящего в зону проектирования, при выполнении условий взрывопожаробезопасности.

И.Ю. Сорокин, асп.; рук. В.А. Тищенко, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»)

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ

До недавнего времени, используемая в лаборатории ЛОФИ на кафедре ПГТ система лазерной диагностики потоков POLIS, позволяла определять основные кинематические характеристики жидкой фазы во влажнопаровом потоке за плоским пакетом лопаток сопловой турбинной решетки методом PIV [1]. Нерешенной оставалась задача по исследованию движения жидких частиц в межлопаточном канале. Это было связано с невозможностью создать плоскость лазерного ножа для засветки канала перед решеткой. Использование насадки-эндоскопа позволило решить эту задачу.

В данной работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению особенностей движения жидкой фазы в межлопаточном канале изолированной сопловой решетки и за ней. На стадии экспериментальных работ исследовалось периферийное сечение сопловой лопатки последней ступени турбины К-1200. Исследования проводились на пародинамическом стенде КВП-2. Применение метода PTV позволило определить основные кинематические характеристики капель в межлопаточном канале. Для обработки экспериментальных данных в среде Matlab был разработан программный блок, позволяющий строить траектории основных потоков капель в пределах канала.

На основе полученных данных определены характерные потоки капель и источники их возникновения. Выявлены особенности движения полидисперсной влажно-паровой среды в межлопаточном канале. Рассмотрены процессы оседания и срыва частиц жидкой фазы на стенках лопаток. Показано, что при обтекании входной кромки формируется область отраженных капель («фонтан» [2]). Часть потока этих капель пересекает межлопаточный канал и кромочный след соседней лопатки. В результате за сопловой решеткой образуется поток крупнодисперсной влаги. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования движения капель в паровом потоке.

Работа выполнена поддержке гранта 15-08-03588А Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. **Разработка** методики применения лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсных влажнопаровых потоков / Г.А. Филиппов [и др.] // Известия РАН, серия Энергетика. 2010. № 6. С. 11—20.
2. **Дейч М. Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат. 1996. 528 с.

А.Б. Тхабисимов, асп.;
рук. Л.И. Селезнёв, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ВЛИЯНИЕ РАСХОДОВ НЕСУЩЕЙ СРЕДЫ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ЭРОДЕНТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время одной из основных причин повреждаемости энергетического оборудования является абразивный износ элементов конструкции проточных частей паровых турбин, происходящий вследствие высокоскоростного взаимодействия с их поверхностями частиц, находящихся в потоке пара и обладающих высокой твердостью.

На интенсивность процесса абразивного износа влияет большое число факторов, таких как скорости и углы атаки твердых частиц [1], температура поверхности, характеристики твердых частиц (твердость, состав, размеры), а также расходная массовая концентрация частиц.

Сложность изучения процесса абразивного износа заключается в его статистическом характере, вследствие того что твердые частицы эродента имеют различную форму, движутся в потоках несущей среды (газ, жидкость и т.д.) по случайным траекториям и взаимодействуют с поверхностями элементов конструкций турбомашин с различными скоростями и под разными углами [2].

Настоящая работа посвящена исследованиям влияния расходов несущей среды и твердых частиц эродента на интенсивность процесса абразивного износа конструкционных материалов на примере сталей 20X13 и 15X11МФ, применяемых для изготовления лопаточных аппаратов первых ступеней ЦВД и ЦСД паровых турбин. В результате проведенных испытаний установлено, что повышение расходной массовой концентрации твердых частиц эродента оказывает значительное влияние на интенсивность процесса абразивного износа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Приказа № 184 от 10 марта 2015 г.

Литература

1. Селезнёв Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б. Влияние угла атаки газоабразивного потока на эрозионный износ плоской мишени из стали 20X13 // Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 116—119.
2. Тхабисимов А.Б., Селезнёв Л.И. Статистические характеристики системы «мишень — эродент» процесса абразивного износа конструкционных материалов, //Тезисы докладов двадцать первой международной науч.-технич. конф. студ. и аспирантов «Радиотехника, радиоэлектроника, энергетика», (26—27 февраля, 2015). Т.4. С. 133.

ВАРИАНТНЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ТПТУ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТПТУ ТИПА Т-100-130 ПАО «МОСЭНЕРГО»

Один из главных показателей эффективности схемных решений при модернизации действующих ТПТУ — эффективность использования пространства существующего машинного зала. Компоновку турбинной установки следует выполнять таким образом, чтобы при монтаже новой ТПТУ требовалось как можно меньше специальных дорогостоящих работ.

Строительство нового котла на старых ТЭЦ в рамках существующего здания практически невозможно. Однако действующие барабанные котлы с П-образной компоновкой и номинальными выходными параметрами по давлению пара за котлом $p_{\text{п}} = 140$ ата, температурой пара $t_{\text{п}} = 560$ °С и расходом в 480 т/ч типа ТГМ-96 можно переделать в котлы с промперегревом (ПП) в рамках существующей котельной ячейки. Расход свежего пара уменьшится приблизительно на 25 % и составит порядка 380 т/ч.

Нами были проведены расчеты тепловой схемы ТПТУ с ПП для двух вариантов ТПТУ. Температура $t_{\text{пп}}$ в расчетах принималась 545 и 555 °С, т.е. соответствовала реально достижимым значениям при модернизации котла. Результаты расчетов представлены на рис. 1—3. Как видно, значительно уменьшение и электрической, и тепловой выработки, а рост КПД незначителен, особенно на теплофикационном режиме — основным для ТПТУ.

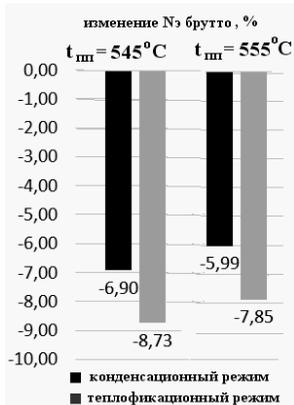


Рис. 1. Изменение электрической мощности ТПТУ с ПП

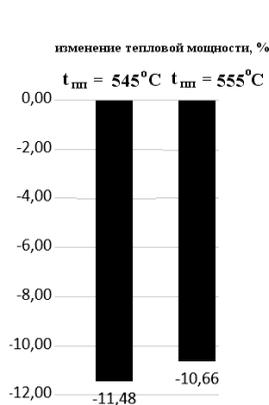


Рис. 2. Изменение тепловой мощности ТПТУ с ПП

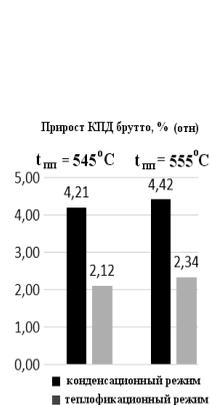


Рис. 3. Изменение КПД ТПТУ с ПП

И.В. Федяшов, студ.; рук. К.А. Плешанов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНОВКИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

В настоящее время в значительной части горизонтальное или вертикальное исполнение котла-утилизатора зависит больше не от предпочтений станции и технических характеристик конструкции, а от технологии завода-изготовителя.

В данной работе предпринята попытка сравнить характеристики работы различных компоновок котла-утилизатора при одинаковых параметрах. Это позволит сравнить габариты котельной ячейки, решения по обеспечению работы испарительного контура [1] и маневренные характеристики [2] и др.

На базе горизонтального котла-утилизатора Еп-277/44/44-10,99/2,18/0,39-566/565/301 (П-143), спроектированного АО «ИК ЗИО-МАР», предназначенного для работы в составе парогазовой установки, состоящей из одной газовой турбины PG9351FA (General Electric), одного КУ и одной паровой турбины I09D12, рассчитаны варианты вертикального котла-утилизатора, изготавливаемого по отечественным и зарубежным технологиям.

Основные требования по реконструкции котла:

- котел-утилизатор включает в себя 3 контура (высокого, среднего и низкого давлений);
- входные и гарантируемые параметры полученного вертикального котла-утилизатора соответствуют значениям этих параметров при горизонтальной компоновке;
- конструкция КУ удовлетворяет требованиям ремонтпригодности, надежности и технологичности;
- порядок расположения ступеней поверхностей нагрева остался неизменным;

Основными решениями по реконструкции котла явились:

- применение питательных электрических насосов для обеспечения многократной принудительной циркуляции в испарительных контурах высокого, среднего и низкого давлений;
- переход на вертикальную компоновку котла-утилизатора.

Литература

1. **Плешанов К.А.**, Стерхов К.В. Расчет циркуляции котла-утилизатора ПР-76-3.3-415// Труды Международной научно-практической конференции «Boiler Designer-2014». 2014. С. 77—82.
2. **Плешанов К.А.**, Стерхов К.В., Зайченко М.Н. Расчёт динамических характеристик котла-утилизатора Новогорьковской ТЭЦ // Электрические станции, 2015. № 4. С. 10—15.

И.Ю. Феценко, студ.; рук-ли Д.А. Хохлов, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»);
В.А. Верещетин (ОАО «ВТИ»)

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ NO_x НА КОТЛЕ БКЗ-420-140 НОВО-СТЕРЛИТАМАКСКОЙ ТЭЦ

В настоящее время довольно остро стоит проблема снижения эмиссии оксидов азота (NO_x) при сжигании органического топлива, в связи с этим происходят многочисленные реконструкции и перевооружение ТЭЦ по всей стране.

По результатам тепловых испытаний парового котла БКЗ-420-140 НГМ ст. №2 на Ново-Стерлитамакской ТЭЦ, которые представлены в табл. 1, концентрации NO_x в дымовых газах для всех режимов в диапазоне (60%-100%) превышают предельно допустимые нормативы (125 мг/м³ для природного газа).

Таблица 1

Результаты тепловых испытаний парового котла БКЗ-420-140НГМ

Паровая нагрузка, т/ч					
220	260	300	340	380	420
NO _x , мг/м ³ (топливо — газ)					
110	125	157	179	204	234

Для снижения выбросов NO_x принято решение о замене топочно-горелочных устройств на более совершенные, применении схемы двухступенчатого сжигания топлива и перенаправлении газов рециркуляции из пода топки в общий раздающий короб. В связи с этим было выполнено следующее.

1. Подготовлена расчетная модель котла БКЗ-420-140 НГМ в программе Boiler Designer с учетом принятых технических решений.
2. Проведен комплекс тепловых расчетов котла БКЗ-420-140 НГМ для разных режимов.
3. Проведен расчет гидравлических характеристик, экологических показателей работы оборудования.
4. Осуществлен тепломеханический расчет выходной ступени пароперегревателя.
5. Проведено CFD-моделирование работы горелочных устройств.

На базе расчетной модели котла была создана адекватная модель котла.

Выполненные задачи позволили проверить работоспособность котла после реконструкции и эффективность работы предлагаемой схемы сжигания топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ВЫХОДНОГО ПАТРУБКА ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-1000-60/1500

Исследование и оптимизация выходных патрубков цилиндров высокого давления турбин АЭС является важной задачей, поскольку в турбинах данного типа относительные потери с выходной скоростью составляют 0,85% от располагаемого тепलोперепада, в то время как в турбинах на СКД данные потери составляют всего 0,3% от располагаемого тепलोперепада. Поэтому уменьшение этих потерь приведёт к заметному росту КПД ЦВД и всей ПТУАЭС.

Важной особенностью паровых турбин АЭС является установка СПП за ЦВД. Одно из условий его нормальной работы — равномерное поле скоростей на входе. Это условие определяет дополнительные требования к организации поля скоростей за выходным патрубком.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. В качестве рабочей среды использовался сжатый воздух, подаваемый в модель выходного патрубка 4 от воздуходувки 1 через успокоительный бак-ресивер 3 для выравнивания параметров во входном сечении модели. Расход измерялся мерным соплом 2. В работе измерялись поля скоростей во входном сечении модели и определялись коэффициенты полных потерь.

Как видно из диаграммы полей относительных скоростей (рис. 2) поле скоростей во входном сечении патрубка не симметрично относительно горизонтальной оси. В верхней части скорости в среднем меньше, чем в нижней более чем в 2 раза. Это свидетельствует о том, что последняя ступень ЦВД работает в нерасчётном режиме, что приводит к снижению КПД ступени, а в рабочих лопатках ступени имеют место переменные по окружности напряжения, что приводит к уменьшению надёжности рабочих лопаток последней ступени.

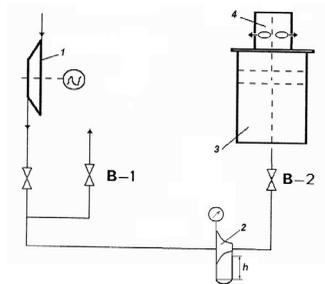


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

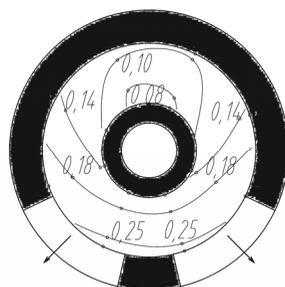


Рис. 2. Диаграмма полей скоростей на входном сечении

*Н.А. Хильков, И.А. Громилин, студенты; рук. О.М. Митрохова, к.т.н.,
доц. (НИУ «МЭИ»)*

УТИЛИЗАЦИЯ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ORC

Как известно, задача повышения эффективности использования энергетических ресурсов решается использованием тепла уходящих газов газотурбинных двигателей (ГТД) для выработки дополнительной электроэнергии путем организации парогазового цикла [1].

Обычно в утилизационном комплексе паросиловая часть — это паротурбинный цикл, где рабочим телом является водяной пар. Однако относительно недавно практическое применение нашли другие рабочие тела, работающие по циклу Ренкина. Органический теплоноситель (пропан, бутан, толуол, фреон и др.) может быть использован для вращения турбины вместо традиционного водяного пара. Такой цикл получил название органического цикла Ренкина (ОЦР технологии).

Проведенные расчеты утилизационного комплекса на базе газотурбинного двигателя НК 16-18СТ для газоперекачивающих станций и турбодетандера показали, что использование бросовой энергии уходящих газов с температурой 442 °С и начальной температурой $t_0 = 380$ °С позволяет выработать 13,99 МВт электроэнергии в дополнительном органическом цикле.

Таким образом, применение ОЦР технологии к утилизационному комплексу, позволяет повысить коэффициент использования теплоты сжигаемого топлива до 43%, а при понижении начальной температуры до 180 °С можно повысить эффективность до 0,475 за счет снижения теплоты уходящих газов.

К основному преимуществу турбоустановки, работающей по органическому циклу Ренкина относительно цикла Ренкина-Клаузиуса (обычная паровая турбина) стоит отнести то, что рабочее тело ОЦР имеет более низкую, чем у воды температуру кипения, т.е. испарение рабочего тела происходит при более низкой температуре, что позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию. Помимо этого, из-за низкой коррозионной активности рабочего тела износ турбодетандера весьма незначителен и отсутствует каплеударная эрозия турбинных лопаток, поскольку весь процесс расширения лежит в области перегретого пара.

Однако специфические свойства органического теплоносителя накладывают некоторые ограничения и сложности при формировании проточной части турбины.

Литература

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 648 с.

ПАРОВОЙ КОТЕЛ Е-120-9,8-540 ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ТЭЦ

Технология факельного сжигания, используемая в большинстве энергетических котлов на территории России и хорошо зарекомендовавшая себя в случаях сжигания газа, мазута и угольной пыли, неприменима для сжигания нетрадиционных видов топлива. В настоящее время актуален вопрос сжигания биотоплива в энергетических котлах. Осуществление данного процесса становится возможным в случае применения технологии сжигания топлива в кипящем слое. Ряд преимуществ данной технологии над факельным сжиганием позволяет эффективно вырабатывать тепловую и электрическую энергию. К таким преимуществам относятся: отсутствие необходимости в предварительной подготовке топлива; возможность сжигания топлива с большим содержанием влаги; хорошее перемешивание топлива и воздуха, и как следствие, меньший избыток воздуха, позволяющий увеличить КПД котла [1]; температуры в зоне горения существенно ниже, чем в котлах с факельным сжиганием, что препятствует образованию оксидов азота.

В настоящее время в соответствии с планом долгосрочной энергетической стратегии Российской Федерации большое внимание уделяется разработке и внедрению энергосберегающих технологий. Одной из таких высокоэффективных технологий является использование конденсерных установок [2]. Такие установки позволяют получить дополнительную теплоту за счет скрытой теплоты парообразования, получаемой при конденсации части водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Установка конденсера в случае сжигания продуктов деревообработки является целесообразной, так как данное топливо высоковлажное, и продукты сгорания содержат в себе большое количество водяных паров.

Целью данной работы является совместное проектирование котла с кипящим слоем и конденсера, которые позволят высокоэффективно сжигать продукты деревообработки.

Литература

1. **Росляков П.В., Плешанов К.А., Ионкин И.Л.** Оптимальные условия для сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом // Теплоэнергетика. 2010. № 4. С. 17—22.
2. **Влияние** конденсационного утилизатора на работу паровых и водогрейных газовых котлов / И.Л. Ионкин, А.В. Рагуткин, П.В. Росляков и др. // Теплоэнергетика. 2015. № 5.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ ОКРУЖНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКА И СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ДИФFUЗОРАХ

Конические и кольцевые диффузоры функционально предназначены для преобразования кинетической энергии потока в потенциальную. Однако, при углах раскрытия α их проточных частей, превышающих $10^\circ \div 15^\circ$, нельзя обеспечить безотрывного течения. В результате резко возрастает окружная неравномерность потока, растут динамические нагрузки и резко снижается эффективность преобразование энергии.

Разработанная установка, изображенная на рис. 1, предназначена для исследования эффективности гашения окружной неравномерности потока с помощью включения в проточную часть поясов отверстий перфорации, замкнутых на общую демпферную камеру, и стабилизации течения с помощью продольного оребрения обтекаемых поверхностей.

Установка состоит из подводящего конфузора 1, исследуемого диффузора 2, соединительной муфты 3, зонда-протяжки 4, неподвижной опоры зонда-протяжки 5, ее крепления 6, в конфузоре 1, подвижной опоры 7, связанной стержнями 8, с координатным цилиндром 9. Измерения статических давлений проводилось как с помощью дренажных отверстий 10, так и с помощью зонда-протяжки 4.

Первые методические исследования показали, что во входном сечении широкоугольных диффузоров имеет место очень большая окружная неравномерность. Кроме того, давления, измеренные с помощью дренажных отверстий 10 во входном сечении оказались на 10—15 % ниже, чем давления, измеренные зондом-протяжкой.

Введение на входном участке диффузоров поясов отверстий перфорации, замкнутых на общую камеру, позволило резко уменьшить окружную неравномерность и повысить эффективность преобразования энергии.

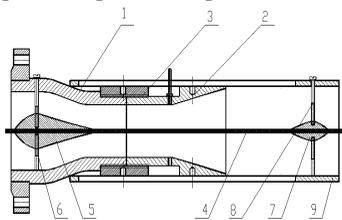


Рис. 1. Установка для исследования диффузоров

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ, НАДЕЖНОСТИ И КОНСТРУИРОВАНИЯ

Председатель секции — д.т.н., профессор В.П. Чирков

Секретарь секции — аспирант Ж.В. Зайкина

Н. Абусейф, студ.; рук-ли А.Н. Демидов, ст. преп.;

М.А. Каримбеков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для обеспечения долговечной бесперебойной и безопасной передачи электроэнергии необходима надежная конструкция высоковольтного ввода, являющегося одним из основных компонентов трансформаторов и линий электропередачи [1]. Поэтому разработка более прочных и легких изоляционных материалов, устойчивых к внешним климатическим воздействиям и способных выдерживать значительные нагрузки, является актуальной задачей.

Целью данной работы является определение механических свойств изоляционных материалов испытаниями на растяжение и статический изгиб при комнатной и отрицательных температурах.

На растяжение были испытаны образцы из изоляционного материала Araldite с исходным диаметром d_0 5,8—6,0 мм и рабочей длиной $l_{\text{раб}}$ 40,3—41,8 мм [2]. Испытания проводились при температурах +23, –30, –45 и –60 °С. Каждый образец был изготовлен в соответствии с ГОСТ 1497-84. В качестве испытательной машины была использована установка Instron 5982. В процессе испытания отображаются в реальном режиме времени две диаграммы деформирования «нагрузка — абсолютное удлинение», «условное напряжение — относительное удлинение».

На статический изгиб были испытаны образцы из изоляционного материала «Araldite» с исходным диаметром $d_0 = 10$ мм и рабочей длиной $l_{\text{раб}} = 80$ мм [2]. Испытания проводились при температурах +23, –30, –45 и –60 °С.

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

1) Снижение температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ не оказывает значительного влияния на механические свойства при испытаниях на растяжения и изгиб.

2) Определено, что на значения разрушающей нагрузки образцов влияет концентрация напряжений в зоне перехода от цилиндрической к конической поверхности образцов.

Литература

1. **Славинский А.З.** Физика диэлектриков. Высоковольтная изоляция энергетической аппаратуры. М.: Научтехлитиздат, 2007. 256 с.

2. **Матюнин В.М.** Механико-технологические испытания материалов. М: Издательство МЭИ, 2005. 40 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОГО РОТОРА С УЧЕТОМ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Учет влияния гироскопического эффекта актуален во многих областях машиностроения. Данная работа посвящена исследованию установившихся колебаний консольного одномассового ротора на двух анизотропных опорах и выявлению некоторых закономерностей его колебаний с учетом гироскопического эффекта [1]. Результаты исследования представлены на рис. 1, 2, где показаны зависимости безразмерных амплитуд колебаний $w_{03x}(t)/\varepsilon$, $w_{03y}(t)/\varepsilon$ в зависимости от частоты вращения ротора ω в двух ортогональных плоскостях с учетом гироскопического эффекта при наборе числа оборотов и их снижении.

Полученные результаты демонстрируют новое любопытное явление, которое условно можно назвать «гармошка»: при наборе числа оборотов (рис. 1) происходит увеличение разности частот $p_{2y}^{(обр)} - p_{1x}^{(обр)}$ («гармошка» разжимается) тем в большей степени, чем больше влияние гироскопического эффекта. Напротив, при снижении числа оборотов на частотах $p_{2y}^{(обр)}$ и $p_{1x}^{(обр)}$ резонансы не реализуются, так как данные частоты достигаются в режиме обратной и прямой прецессии соответственно (рис. 2). Режим обратной прецессии реализуется только между частотами $p_{1x}^{(обр)}$ и $p_{1y}^{(пр)}$. Разность указанных частот $p_{1y}^{(пр)} - p_{1x}^{(обр)}$ уменьшается («гармошка» сжимается).

Таким образом, как видно из рис. 1, 2 гироскопический эффект оказывает существенное влияние на установившиеся колебания ротора и пренебрегать им нельзя. Разработанный подход может быть легко интегрирован в современные системы мониторинга и диагностики.

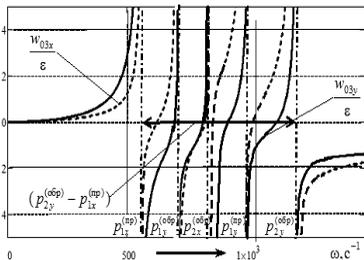


Рис. 1. Амплитудно-частотная зависимость для диска при наборе числа оборотов

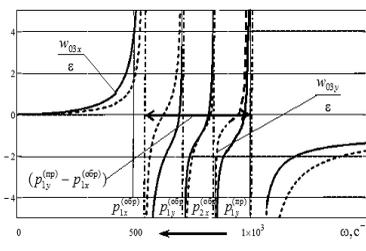


Рис. 2. Амплитудно-частотная зависимость для диска при снижении числа оборотов

Литература

1. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. М.: Физматлит, 2013.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В РАБОЧУЮ СРЕДУ ПАРОВОДЯНОГО КОНТУРА АЭС

Одной из актуальных проблем, возникающих при эксплуатации энергоблоков АЭС, является эрозионно-коррозионный (ЭК) износ металла. Этому виду повреждений подвержены практически все поверхности трубопроводов и оборудования (ТиО) пароводяного контура атомных электростанций, находящиеся в контакте с движущейся средой. На практике выделяют общую (равномерный и реализующийся на больших площадях износ металла) и локальную эрозию-коррозию (зональное разрушение металла, вызванное особенностями гидродинамики потока).

В результате общей ЭК происходит вынос железосодержащих соединений в поток рабочего тела, что в конечном итоге, приводит к образованию отложений в парогенераторах (ПГ) АЭС. Механизмы локального утонения металла на внутренних поверхностях рабочего контура могут приводить к внезапным разрушениям ТиО. Как следствие снижается надежность и эффективность работы энергоблоков.

На АЭС проблема ЭК металла ТиО решается одновременным применением активных и пассивных методов: своевременное проведение неразрушающего контроля металла, оптимизация водно-химического режима (ВХР), выбор более устойчивых к ЭК сталей и др.

Как известно [1], величина скорости ЭК зависит от локальных значений рН среды (воды или жидкой пленки, находящихся в контакте с металлом), определить которые экспериментально для всех точек контура невозможно. Работа посвящена разработке и апробации математической модели “КОНТУР АЭС”, позволяющей расчетным путем определить рН в любой точке модели второго контура блока АЭС с РУ ВВЭР-1000, вычислить скорость общей и локальной ЭК, (на основе использования “РАМЭК” [2]), оценить вынос железосодержащих соединений, с поверхности металла каждого из элементов ТиО, тем самым предоставив исходные данные для оценки величины отложений в ПГ. Использование “КОНТУР АЭС” позволяет проводить оценку эффективности различных мероприятий (по оптимизации ВХР, выбору стойких металлов) для решения проблемы ЭК.

Литература

1. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Диаграмма значений рН жидкой и паровой фаз при изменении агрегатного состояния H₂O в технологическом контуре АЭС и ТЭС // Теплоэнергетика. 2010. № 7. С. 31—37.
2. **Аттестационный паспорт** ПС РАМЭК-1 // № 359 от 14.10.2014, 6 с.

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ УЧАСТКОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В НЕПРОЕКТНОМ ПОЛОЖЕНИИ

На стадии проектирования линейной части магистральных трубопроводов исходят из недопустимости возникновения выпученных участков, но отклонения от проекта при строительстве, действие случайных факторов, несовершенство расчетных методик приводят к тому, что подземный газопровод выходит на дневную поверхность с образованием так называемого арочного выброса [1]. Такие участки газопроводов на севере Западной Сибири, европейского Севера России достаточно многочисленны. Поэтому возникает задача, решение которой должно дать ответ на вопрос о возможности эксплуатации участков газопроводов, а также позволит разработать критерии, которые бы определяли вывод участка в ремонт, либо необходимость контроля за ним, либо принятие дополнительных мероприятий по обеспечению эксплуатационной надежности [2]. При решении данной задачи основное внимание уделяют анализу НДС с учетом реально действующих нагрузок и граничных условий.

В работе приведены результаты исследования влияния граничных условий и величины сжимающего продольного усилия на напряженно-деформированное состояние симметричного арочного выброса. Участок трубопровода моделировался полым стержнем кругового сечения с неоднородными граничными условиями, подверженным действию поперечной нагрузки, внутреннего давления и температурных напряжений.

Проведенный анализ показал, что расчет напряженно-деформированного состояния при изгибе участка газопровода в большинстве случаев необходимо проводить с учетом эквивалентного сжимающего усилия. Кроме того, по результатам анализа получены простые инженерные формулы, которые при соблюдении соответствующих условий на длину пролета и величину эквивалентного сжимающего усилия могут быть использованы для разработки инженерных методик, позволяющих с приемлемой для практических целей точностью определять изгибные напряжения в наиболее опасных сечениях участка газопровода, находящегося в непроектном положении.

Литература

1. **Харионовский В.В.** Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 467 с.
2. **Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г.** Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1982.

М.К. Жамбаева, студ.; Н.М. Мухамедова, асп.;
рук. Ш.Р. Курбанбеков, к.т.н., с.н.с. (ГУ имени Шакарима, г. Семей)

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИЦИРОВАННОГО ГРАФИТА

Одним из широко применяемых и востребованных углеродосодержащих материалов в Казахстане на сегодняшний день является силицированный графит, хотя собственное производство отсутствует. Он представляет собой композиционный материал, содержащий углерод, карбид кремния и непрореагировавший кремний.

Важными областями его применения являются черная и цветная металлургия, авиаракетная техника, технология полупроводниковых материалов, атомная энергетика и другое [1].

Цель работы: исследовать принципиальную возможность получения силицированного графита методом порошковой металлургии.

В качестве исходных материалов для получения силицированного графита была использована графитсодержащая композиция. Для проведения экспериментов была подготовлена шихта с различным соотношением компонентов, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Соотношение массовых составов исследуемых образцов

Наименование образцов	Состав образцов масс. %	
	SiO ₂	C
C1	40	60
B2	70	30
C2	60	40

Материаловедческие исследования проводились следующими методами: исследования на микроскопе «OLYMPUS-BX41M», СЭМ-анализа на растровом микроскопе JSM-6390, рентгеноструктурного исследования на дифрактометре ДРОН-3М. На основе анализа полученных данных по синтезу силицированного графита были сделаны следующие практически полезные выводы:

- экспериментальным путем определены основные требования к компонентам для получения силицированного графита;
- разработаны технологические режимы спекания;
- полученный экспериментальным путем силицированный графит имеет необходимую твердость от 10840 до 15900 МПа;
- при рентгеноструктурном анализе выявлено, что основная фаза имеет нужную гексагональную структуру SiC с параметром решетки 0,3073 нм.

Литература

1. **Фиалков А.С.** Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе.. М.: Аспект Пресс, 1997.

УСТОЙЧИВОСТЬ И ЗАКРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПАНЕЛИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Критические значения параметров неконсервативных нагрузок в задачах упругой устойчивости определяются соотношениями между частотами, определяющими динамический тип потери устойчивости [1]. Яркой иллюстрацией этой особенности является парадокс Николаи, обнаруженный в 30-е годы XX века. Позже в работе [2] было показано, что в задаче Бека для стержня, связанного с упругим основанием, критическое значение следящей силы не зависит от жесткости упругого основания. С ссылкой на то, что при вычислении критической нагрузки не учитывалось рассеяние энергии это положение подверглось критике [3]. Однако несколько позже в статье [4] были проведены аналогичные исследования с учетом внешнего и внутреннего трения и установлено, что при малом и умеренном демпфировании критическое значение следящей силы не зависит от жесткости упругого основания. Причина этого явления кроется в том, что с ростом жесткости основания происходит сближение низших частот, ответственных за наступление флаттера, а увеличение мощности неконсервативной нагрузки, необходимой для раскачивания системы большей жесткости, обеспечивается увеличением частоты флаттера.

В настоящей работе рассматривается задача об устойчивости плоской панели, связанной с упругим основанием, находящейся в сверхзвуковом потоке газа и сжатой в направлении потока мембранным усилием. В работе проанализирована зависимость критического значения скорости потока от параметров системы, построены границы области устойчивости на плоскости параметров нагружения, а также подробно изучено закритическое поведение панели. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и расчете сверхзвуковых летательных аппаратов.

Литература

1. **Болотин В.В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. — М.: Физматгиз, 1961. 339 с.
2. **Smith T. E., Herrmann G.** Stability of a Beam on an Elastic Foundation Subjected to a Follower Force // *J. Appl. Mech.*, 1972. Т. 39. Р. 628—629.
3. **Волошин И.И., Громов В.Г.** О критерии устойчивости стержня на упругом основании при действии следящей силы // *Изд. АН СССР, Механика твердого тела*. 1977. № 4. С. 169—171.
4. **Радин В.П., Чирков В.П., Щугорев А.В.** Устойчивости стержня на упругом основании при непотенциальном нагружении // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2008. № 5. С. 5—11.

В.Н. Зеликов, студ.; рук. С.Ф. Кузнецов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ К ВОЗМУЩЕНИЯМ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В существующей расчетной практике при выборе моделей конструкций и постановке задач расчета обычно игнорируется их возможная чувствительность к возмущениям параметров модели и входной информации. Вместе с тем, в отношении реальной конструкции модельные представления никогда не реализуются точно, и результаты расчета можно считать достоверными только при достаточно низкой чувствительности к перечисленным выше факторам.

В работе проведено исследование чувствительности некоторых распространенных моделей механики конструкций в отношении возмущений входной информации. Решение соответствующих задач рассматривается как отображение элемента F векторного пространства входной информации (нагрузки, воздействия) на пространство выходной информации (перемещения, деформации, характеристики внутренних сил) посредством линейного алгебраического оператора A : $AF = W$, где W — вектор выходной информации. Такое представление адекватно постановке многих практических задач, при этом чувствительность решения (выхода) определяется спектральными свойствами оператора A [1].

Для случаев, в которых A — квадратная, симметричная, положительно определенная матрица, получены двухсторонние оценки чувствительности при заданной конфигурации входа (схеме нагружения). В качестве показателя чувствительности принят коэффициент, связывающий относительные характеристики возмущений входных и выходных данных при их оценке в среднеквадратических нормах. Показано, что наибольшая чувствительность соответствует случаю коллинеарности вектора входа F , собственному вектору матрицы A , корреспондирующему с минимальным собственным числом, при этом показатель чувствительности равен спектральному числу обусловленности матрицы.

Приведены примеры моделей конструкций и схем нагружения, рассмотрение которых теряет рациональное содержание вследствие высокой чувствительности к возмущениям входной информации. Представлены результаты сравнительного анализа чувствительности статически определимых и неопределимых систем, а также влияния выбора норм для оценки величин возмущений.

Литература

1. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир. 1980.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОДВЕСНОГО ИЗОЛЯТОРА

В работе рассматривается прочностной расчет изолятора из нового полимерного материала. Изолятор предназначен для крепления и изоляции неизолированных и защищенных проводов высоковольтных линий переменного тока напряжения 35 кВ частотой до 100 Гц. Температурные условия работы изолятора от минус 60 до плюс 50 градусов С [1].

Расчет на прочность изолятора производится в программе ANSYS Workbench. В результате статического анализа определяются деформации точек изолятора (рис. 1). Максимальная деформация составляет (при заданной боковой распределенной нагрузке $P = 100$ кПа) 0,19 мм, она наблюдается в точке приложения силы (на рисунке справа). Минимальная деформация наблюдается в точке закрепления изолятора (на рисунке слева).

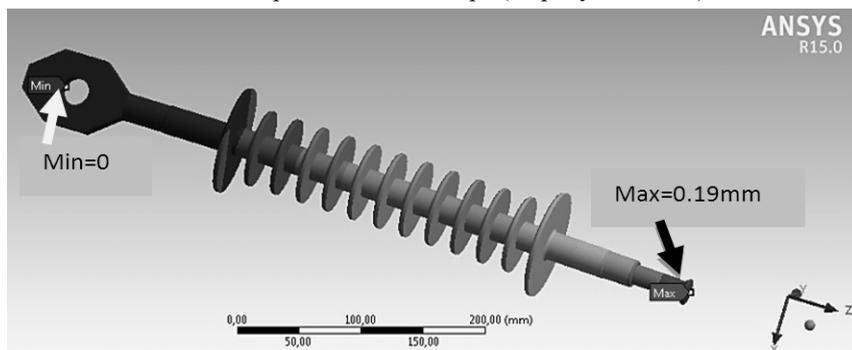


Рис. 1. Деформации точек изолятора, полученные в результате статического анализа

В результате статического анализа определяются напряжения в изоляторе. Проводятся расчеты деформации с учетом влияния температуры. Исследование модели изолятора при различных видах расчётов (механических и температурных) показывает, что значения деформаций и напряжений, которые возникают в подвесном изоляторе, не противоречат технологическим нормам. Полученные результаты работы, выполненной по предложению кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ИГЭУ, используются в конструкторско-проектировочных работах, выполняемых на этой кафедре.

Литература

1. Каталог изоляторов / Компания ЗАО «Южноуральская изоляторная компания». 2009.

С.И. Коломенский, студ.; рук. Е.В. Позняк, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ МОДЕЛИ КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА

Угловые движения грунта при землетрясениях являются одной из причин обрушения высотных зданий; вследствие поворота плоскости фундамента здание подвергается раскачиванию (особенно при длинах сейсмических волн, соизмеримых с размерами фундамента), что может привести к потере устойчивости конструкции и разрушению несущих элементов. Влияние, оказываемое ротационными составляющими сейсмического воздействия на перемещения конструкции, может быть существенным и требует учёта при анализе сейсмической реакции.

Для описания движения грунта во время землетрясения применяется интегральная дилатационно-ротационная модель сейсмического воздействия (подробное описание модели присутствует в [1]). Она предусматривает как поступательные, так и угловые движения грунтового основания. Расчет ротационных компонент осуществляется с использованием обобщенной волновой модели по методике, предложенной Ю.П. Назаровым в трудах [2, 3].

Создание модели каркасного здания и проведение численного анализа её сейсмической реакции с учётом угловых движений грунта выполняется с использованием программного вычислительного комплекса MATLAB. В качестве входного сейсмического воздействия приняты трех- и шестикомпонентные акселерограммы. Динамический анализ включает расчет перемещений модели во временной области и сравнение двух случаев сейсмического воздействия: с ротациями и без них.

Перспективы использования результатов важны для развития численных методов анализа сейсмической реакции строительных конструкций с учётом угловых движений грунта.

Литература

1. **Назаров Ю.П.** Расчетные модели сейсмических воздействий. М.: Наука, 2012. 414 с.
2. **Назаров Ю.П., Позняк Е.В., Филимонов А.В.** Анализ вида волновой модели и получение расчётных параметров сейсмического воздействия для высотного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 5. С. 45—50.
3. **Назаров Ю.П.** Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия. М.: Наука, 2010. 468 с.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В качестве элемента конструкции летательного аппарата выбрана деталь концевого элерона. Создается модель детали и производится расчет на прочность при варьировании геометрических параметров и материала. Целью является отработка методики численного расчета напряженно-деформированного состояния. В связи с этим используется обобщенная исходная информация о детали элерона.

Выполненная в программе SolidWorks3D-модель параметризуется для большего удобства изменения размеров и импортируется в ANSYS. Модель закрепляется по торцам жесткими заделками и задается распределенная нагрузка с общим значением 900 МПа на верхних плоскостях (рис. 1).

Проведен сравнительный расчет для двух видов геометрии элемента конструкции. По результатам расчетов наиболее оптимальной с точки зрения максимальных деформаций является конструкция детали с закругленными краями.

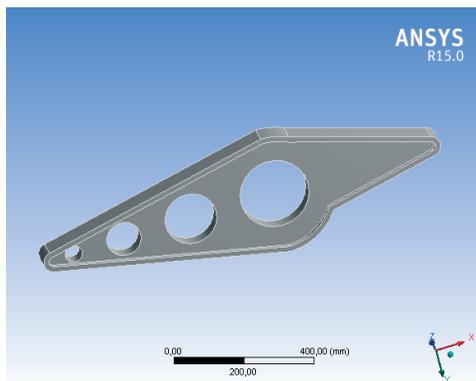


Рис. 1. Модель детали концевого элерона

Проведен сравнительный расчет детали, изготовленной из трех материалов: нержавеющая сталь, структурная сталь, дюралюминий. По результатам расчетов на прочность и жесткость наиболее приемлемым является материал дюралюминий. При этом максимальная деформация 0,007 мм наблюдается в центральной части конструкции.

А.В. Пашенко, А.А. Пискунов, Д.А. Щёлоков, студенты;
рук. Ю.Н. Самогин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ НИЗШИХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ДВУХОПОРНОГО ВАЛА РОТОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КВАЗИДИАГОНАЛИЗАЦИИ

Расчет низших собственных частот и форм колебаний инженерных конструкций актуален во многих областях энергомашиностроения. В данной работе проводится оценка влияния ужесточения вала насадными дисками на собственные частоты и формы колебаний ротора на основе метода квазидиагонализации [1]. Результаты расчета первой $W_y^{(1)}$ и второй $W_y^{(2)}$ форм колебаний вала ротора низкого давления паровой турбины, приведены на рис. 1.

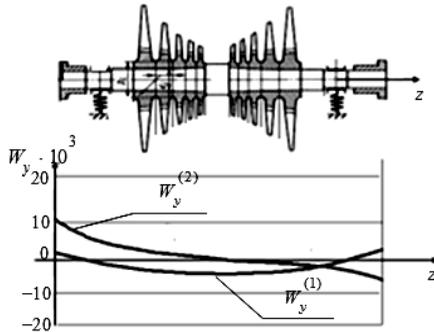


Рис. 1. Конечно-элементная модель ротора и его две низшие формы колебаний

Анализ результатов расчета показал, что ужесточение вала насадными дисками оказывает влияние в основном на первую собственную частоту колебаний ротора. Для второй собственной частоты влияние насадных деталей невелико.

Таким образом, так как низшие частоты и формы колебаний ротора вносят существенный вклад в его вибрацию, то ужесточением вала насадными дисками пренебрегать нельзя. Полученные результаты могут быть использованы при создании и совершенствовании современных систем мониторинга и диагностики.

Литература

1. Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод квазидиагонализации для расчета собственных частот и форм свободных колебаний механических систем по схемам высокой размерности // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 1. С. 53—57.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОХОЖДЕНИЯ РОТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗОНАНС НА ОСНОВЕ МЕТОДА КВАЗИДИАГОНАЛИЗАЦИИ

Расчет колебаний различных объектов машиностроения, приборостроения, транспортной и строительной техники на динамические нагрузки является необходимым элементом обеспечения надежности и безопасности сложных технических систем. Сегодня такие задачи решают прямыми методами, что требует высокой вычислительной мощности.

В данной работе мы предлагаем использовать метод расчета колебаний линейных механических систем, основанный на специальном сочетании декомпозиции с конденсацией динамических уравнений [1]. Данный подход имеет два существенных преимущества. Во-первых, матрицы блочно-диагональные. Во-вторых, порядок системы разрешающих уравнений существенно сокращен. Кроме того, конденсация по частотному признаку ведет к улучшению устойчивости счета, так как обусловленность матрицы зависит от отношения высшей собственной частоты системы к низшей.

Решая типовую задачу прохождения однодискового ротора (рис. 1) (масса диска m ; длина вала a ; изгибная жесткость сечения вала EJ ; коэффициенты жесткости и демпфирования подшипников c^y и b^y) через резонанс в режиме набора угловой скорости вращения, мы определили погрешности метода, а также оптимальную угловую скорость, с которой стоит проходить резонанс.

Используемый в работе подход позволяет сравнительно просто, без использования дорогостоящих пакетов программ проводить анализ вибрации роторных машин и оценить влияние на них различных конструктивных и эксплуатационных факторов. Знание подобных закономерностей позволяет в кратчайшие сроки проектировать и производить машины с низким уровнем вибрации и высокой эксплуатационной надежностью. Данный подход легко интегрируется в современные системы мониторинга и диагностики.

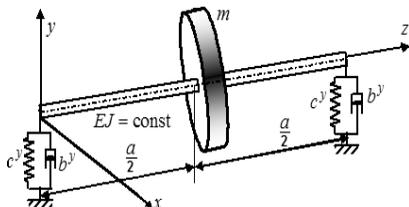


Рис. 1. Однодисковый ротор на упруго-вязких опорах

Литература

1. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. М.: Физматлит, 2013.

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

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ТРЕХКУПЛЬНОЙ ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭТАПЕ СПУСКА

В настоящее время наша страна находится на рубеже смены поколений используемой космической техники. Это и создание нового семейства ракет-носителей «Ангара» легкого, среднего и тяжелого класса, ракетный двигатель РД-193. Производство пилотируемого транспортного корабля (ПТК) нового поколения предполагает использование новых средств спасения и возврата экипажа. В процессе проектирования парашютной системы для разрабатываемого в настоящее время РКК «Энергия» возвращаемого аппарата (ВА) массой 9 тонн и рассчитанного на пятерых членов экипажа (вместо нынешнего трехместного аппарата массой 3,8 тонн), ее в силу ряда причин [1] было решено сделать трехкупольной, взамен имеющейся однокупольной прежнего Союза. Это поставило ряд вопросов перед инженерами в области расчета этапов функционирования [2], в частности динамики спуска и изучения колебаний ВА на трехкупольной парашютной системе (ЗкПС) и предопределило необходимость разработки новых подходов к расчету динамики вместо стандартных, применяемых для однокупольных систем. Ставятся задачи об определении ориентации ВА в пространстве в периоды функционирования тормозных и основных парашютов, а также его положения в момент касания земли для штатного срабатывания опор приземления.

В работе приводится анализ и обобщение как имеющихся на сегодняшний день, так и вновь проведенных экспериментальных исследований в аэродинамических трубах ЦАГИ, результатов летных модельных экспериментов. Предложены идеи реализации математической модели (ММ) динамики движения ЗкПС. Тестирование ММ будет проведено на имеющемся экспериментальном материале.

Литература

1. **Васильченко А.Г., Погорелов М.В.** Проблемы моделирования пространственных колебаний трехкупольной парашютной системы // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXI Межд. симп. им. А.Г. Горшкова (Вятичи, 16—20 февраля 2015 г.). М.: МАИ, 2015. Т. 1.

2. **Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарёв А.Т.** Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. М.: Физматлит, 2009.

Д.М. Поляков, И.И. Рамушев, Г.А. Тарасов, студенты;
рук. Ю.Н. Самогин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА В РЕЖИМЕ НАБОРА ЧАСТОТЫ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО КОНТАКТА РОТОРА О СТАТОР

Одной из причин нарушения нормальной работы турбины является повышенная вибрация. В турбине не допускается задевание вращающихся частей о неподвижные. В работе предложена конечно-элементная модель ротора, позволяющая исследовать его неустановившиеся колебания в режиме набора угловой скорости вращения с учётом возможного контакта ротора о статор [1]. Результаты исследования показаны на рис. 1, 2. Графики на рис. 1 показывают прохождение ротором первого и второго резонансов, когда мгновенная частота возбуждающей силы в моменты времени t_{*x}, t_{*y} равна первой и второй собственной частоте ротора. В режиме прохода ротором второго резонанса происходит его соударение о статор. Нормальная сила реакции со стороны ротора на статор показана на рис.2. Разработанный подход позволяет сравнительно просто проводить анализ вибрации роторных машин, и может быть легко интегрирован в современные системы мониторинга и диагностики.

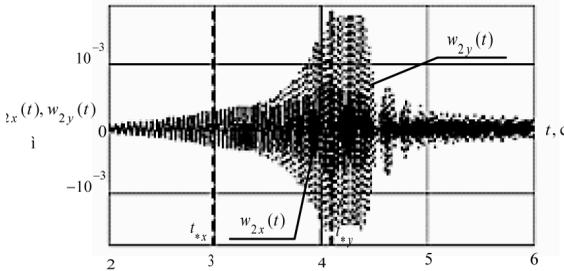


Рис. 1. Процесс прохождения ротором резонансов в режиме набора числа оборотов

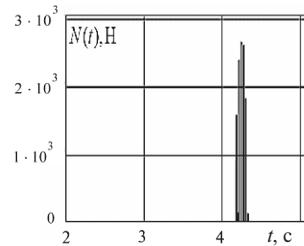


Рис. 2. Нормальная сила реакции в точке контакта ротор-статор

Литература

1. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. М.: Физматлит, 2013.

Н.А. Стасенко, студ.; рук. В.М. Матюнин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОБОСНОВАНИЕ КОРРЕКТНОСТИ УСЛОВИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ ИЗДЕЛИЙ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

В промышленности существует широкая номенклатура металлических изделий, имеющих малую толщину — мембраны, фольги, листы и т.д. Одним из наиболее простых и информативных способов контроля механических свойств таких изделий является метод твердости, который позволяет получать информацию о механических характеристиках изделий путем выполнения измерений непосредственно на изделии без его разрушения. Однако для корректного определения характеристик твердости изделий малой толщины необходимо учитывать их толщину. Согласно нормативным документам, регламентирующим методы определения твердости металлических материалов (ГОСТ 9012—59, ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, ГОСТ Р 8.748—2011 и др.), толщина контролируемого изделия должна быть в 8—10 раз больше, чем глубина получаемого на его поверхности отпечатка. Аналогичные сведения приведены и в технической литературе. При этом ни в ГОСТах, ни в литературе не приводится обоснования выбора таких соотношений. Недавние исследования деформируемого объема металла под отпечатками, полученными вдавливанием индентора, проведенные в НИУ «МЭИ» [1], позволили установить, что для большинства сталей отношение глубины зоны распространения пластической деформации под отпечатком к его глубине составляет примерно 15—16. В связи с этим для корректного определения твердости необходимо при испытаниях обеспечивать отношение толщины контролируемого изделия к глубине отпечатка не менее 15—16.

В настоящей работе на автоматизированном твердомере Instron Tukon 2500 были проведены эксперименты по оценке влияния отношения толщины изделия к глубине отпечатка на результаты определения твердости по Виккерсу. Результаты исследований показали, что различие значений твердости тонких изделий, определенных по предложенным в НИУ «МЭИ» условиям по сравнению со значениями, определенными по требованиям ГОСТ, может достигать 10 %. Эксперименты проводились автором, либо при его непосредственном участии. Полученные результаты могут быть полезны при разработке методик контроля механических свойств тонких изделий и покрытий различного назначения.

Литература

1. Матюнин В.М., Марченков А.Ю. Распределение напряжений и деформаций в пластически деформированном объеме металла при вдавлении сферического индентора // V Международная конференция «DFMN-2013». Сборник материалов. — М.: ИМЕТ РАН, 2013. С. 85—86.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — зав. каф. теор. мех., д.т.н.

И.В. Меркурьев

Секретарь секции — к.ф.-м.н., доцент *Г.В. Панкратьева*

*Н.Д. Бабанов, асп.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»);
конс. М.Д. Копыркин, остеопат (МАО)*

МОДЕЛЬ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО ЭКСОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

В настоящее время активно ведутся работы по разработке конструкций экзоскелета нижних конечностей человека [1]. Особый интерес вызывает воздействие механизма на человека, облаченного в экзоскелет (оператора). Анализ современных изделий показал, что строение платформы — подошвы экзоскелета напрямую влияет на походку и, как следствие, на суставы и мышцы человека.

В известных моделях экзоскелета [2, 3] используется, как правило, трехзвенная модель нижней конечности, в которых стопа представляется в виде жесткого стержня. В [4] описаны функции стопы, из которых явно видно, что при наложении дополнительных ограничений на движение стопы меняется походка оператора, проявляется «степаж». Необходимость обеспечения траектории движения оператора, при которой сохраняется естественный след ноги и не травмирующая человека походка, требует тщательной проработки конструкции стопы экзоскелета.

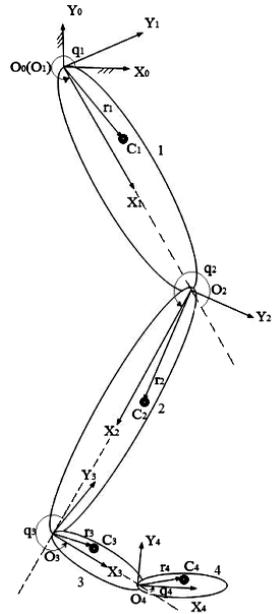


Рис. 1. Принципиальная схема экзоскелета

В данной работе построена математическая модель четырехзвенной нижней конечности экзоскелета (рис. 1) со всеми весомыми элементами. По сравнению с известными моделями добавлена фаланга пальцев. Предложена программа испытаний для натуральных экспериментов, суть которых в наложении ограничений на подвижность стопы и голеностопного сустава.

Литература

1. **Kazerooni H.** Exoskeletons for Human Performance Augmentation. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
2. **Формальский А.М.** Перемещение антропоморфных механизмов. М.: Наука, 1982.
3. **Журавлёв Е.А., Багаутдинов И.Н.** Построение уравнений динамики плоского трехзвенника с использованием базисных функций обобщенных координат // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8–1.
4. **Капанджи А.И.** Нижняя конечность. Функциональная анатомия. М.: Эксмо, 2010.

П.Е. Ганин, асп.; рук. А.И. Кобрин, д.ф.-м.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ FESTO

В работе проведено моделирование промышленного манипулятора, построенного на основе шаговых двигателей фирмы Festo, с использованием в качестве управляющего устройства программируемого логического контроллера (ПЛК) Siemens. Разработанная модель позволяет подобрать оптимальные параметры регулирования для достижения требуемых характеристик манипулятора в зависимости от выбранных исполнительных механизмов. Для данной конструкции построена область достижимости и составлена система уравнений, описывающих его кинематику.

Виртуальная модель системы построена с помощью программного продукта Matlab Simulink. Модель включает элементы, представляющие работу звеньев и сочленений манипулятора. Физическая реализация модели требует подбора исполнительных, управляющих и связующих устройств. На рис. 1 представлена схема манипулятора с указанием основных функциональных элементов, необходимых для управления двигателями манипулятора.

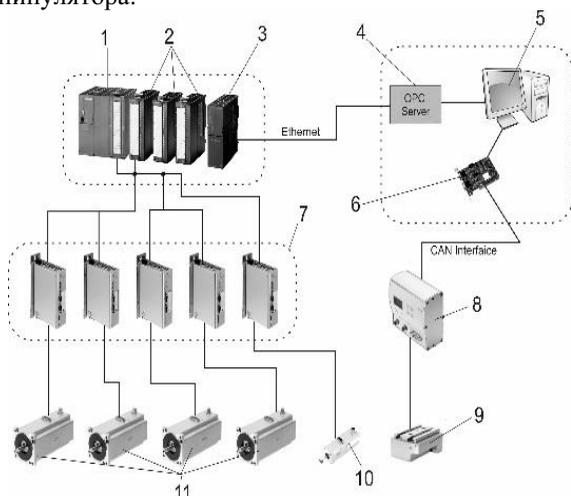


Рис. 1. Функциональная схема манипулятора:

1 — программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens CPU313C-2 DP; 2 — аналоговые модули расширения SM334; 3 — коммуникационный модуль CP 343-1 Lean; 4 — OPC-сервер; 5 — персональный компьютер; 6 — плата расширения CAN-Interface для ПК; 7 — контроллеры двигателей Festo; 8 — контроллер захвата Festo SFC-DC; 9 — захват Festo HGPLC; 10 — шаговый двигатель Festo EMMS-ST-42; 11 — шаговые двигатели Festo EMMS-ST-87

О ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА ОТ ЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НА ФЕРМЕ

Рассматриваются колебания груза в одном из узлов плоской фермы. Для выявления наиболее уязвимых мест фермы, проводится анализ зависимости частоты колебаний груза от его местоположения.

Аналогичная задача рассмотрена в [1-2]. Используется метод индукции [3], применимый для регулярных систем периодической структурой. Не уменьшая общности анализа, получим аналитические выражения для ферм (рис. 1) с числом панелей $N = 42$. Точное выражение для коэффициента податливости плоской решетчатой фермы в зависимости от номера узла n , на котором располагается груз, имеет вид

$b_n = (A_n a^3 + C_n c^3 + H_n h^3) / (126h^2)$, где коэффициенты A_n , C_n и H_n —

функции номера узла n . Аналогично для фермы с треугольной решеткой имеем: $b_n = (A_n a^3 + C_n c^3) / (63h^2)$, где коэффициенты:

$$A_n = 8n^4 - 672n^3 + 14111n^2 + 42n, \quad C_n = -3n^2 + 126n.$$

Сравнение полученных в ходе решения зависимостей показывает, что конструкция плоской балочной фермы с треугольной решеткой имеет меньшую частоту колебаний по сравнению с плоской решетчатой фермой при равном числе панелей. Обнаружены всплески частот на краю решетчатой фермы, характерные для подобных конструкций [3,4].

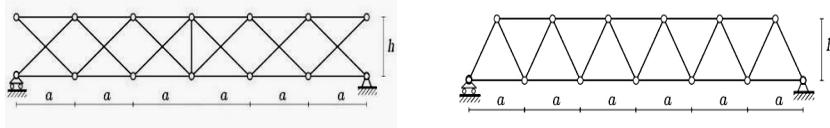


Рис. 1. Решетчатая и балочная фермы $N = 6$

Литература

1. Ахмедова Е.Р., Канатова М.И. Собственные частоты колебаний плоской балочной фермы регулярной структуры // Наука и образование в XXI веке: сборник науч. трудов Международной науч-практич. конф. в 17 частях. Часть 11. (Тамбов, ООО «Консалтинговая компания Юком», 31 октября 2014).

2. Канатова М.И. Частотное уравнение и анализ колебаний плоской балочной фермы // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. М: Инфра-М. Т. 1.

3. Кирсанов М.Н. Анализ прогиба решетчатой балочной фермы распорного типа // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57).

4. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет многорешетчатой фермы // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 6 (257).

Д.А. Маслов, асп.; рук-ли Ю.А. Коняев, д.ф.-м.н., проф.;
И.В. Меркурьев, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ РЕЗОНАТОРА ВИБРАЦИОННОГО СТЕРЖНЕВОГО ГИРОСКОПА ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Рассматривается принадлежащий к классу гироскопов обобщенного маятника Фуко [1] вибрационный гироскоп, резонатор которого представляет собой тонкий упругий стержень. Гироскопы данного типа находят широкое применение в навигационных системах подвижных объектов.

В системе управления гироскопом применяется мягкое резонансное позиционное возбуждение колебаний чувствительного элемента с помощью силового электромагнитного контура, образованного неподвижными электромагнитными катушками и резонатором из магнитомягкого материала. На катушки электромагнитов помимо постоянного опорного напряжения подается еще и переменное, вызывающее не только позиционное, но и параметрическое возбуждение колебаний. Получены дифференциальные уравнения электромеханической системы, описывающие в одномодовом приближении изгибные колебания резонатора и электромагнитные процессы во взаимосвязанной форме. С помощью спектрального варианта метода осреднения регулярно возмущенных систем дифференциальных уравнений с периодическими матрицами [2] определены области неустойчивости стационарных колебаний в пространстве параметров системы. Уравнения аналогичного вида, описывающие динамику волнового твердотельного гироскопа с цилиндрическим резонатором, исследовались в [3] с помощью метода осреднения Крылова–Боголюбова и критерия устойчивости Льенара–Шипара. Полученные обоими методами области неустойчивости стационарных колебаний резонатора совпадают. При этом метод осреднения Крылова–Боголюбова позволяет получить систему уравнений в медленных переменных, а спектральный вариант метода осреднения дает возможность свести систему дифференциальных уравнений к системе с почти постоянной матрицей и сразу найти условия устойчивости.

Литература

1. **Журавлёв В.Ф.** Управляемый маятник Фуко как модель одного класса свободных гироскопов // Изв. АН МТТ. 1997. № 6.
2. **Коняев Ю.А.** О некоторых методах исследования устойчивости // Мат. сборник. 2001. Т. 192. № 3.
3. **Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuryev I.V.** Studying Stationary Oscillation Modes of the Gyro Resonator in the Presence of Positional and Parametric Excitations // Gyroscopy and Navigation. 2014. Vol. 5. № 4.

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

МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ВРАЩЕНИЯ С НАКАТОМ ЛЕНТ НА ПРИЗМАТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Создание позиционных устройств с электростатическим накатом упругих лент — перспективное направление в разработке новых, энергоэффективных, дешевых, долговечных приборов, которые находят применение в различных современных электростатических системах.

Работа посвящена исследованию микромеханического устройства, составной частью которого является система шести микроактюаторов с электростатическим накатом упругих металлических лент на сегнетоэлектрическую пленку. Один конец ленты связан с подвижным элементом (ротором), другой закреплен на подложке статора (правильная шестиугольная призма).

Линейные перемещения системы осуществляются путем создания требуемых напряжений на обкладках конденсатора переменной емкости, образованного проводящей лентой и неподвижным электродом.

Для предложенной конструктивной схемы выполнен анализ геометрии движения устройства, определена область допустимых углов поворота ротора, установлены дифференциальные соотношения для линейного и углового перемещений ленты.

В процессе исследования динамики в качестве модели для ленты принят нерастяжимый невесомый гибкий стержень, находящийся в состоянии продольно-поперечного изгиба [1].

С учетом выбранной модели нелинейная квазистатическая краевая задача приведена к сингулярно возмущенному виду и решена с помощью асимптотических разложений, что позволило построить выражения для реакций ленты на ротор (продольная и поперечная силы, изгибающий момент) в первом и втором приближениях.

При моделировании движения учитывались различные виды нагружений, в том числе связанных с возвратом ротора в начальное положение.

В работе приводятся результаты численного анализа влияния значений массовых, жесткостных и геометрических параметров на характеристики движения позиционного устройства.

Литература

1. Устинов В.Ф., Степанов А.С. Анализ динамики разгона и квазиустановившегося режима электростатического планарного устройства // Вестник МЭИ. 2012. № 1.

А.М. Русаков, асп.; рук. Г.В. Панкратьева, к.ф.-м.н. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ММГ В РЕЖИМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Микромеханические гироскопы (ММГ) широко используются в настоящее время в навигационных системах различных подвижных объектов, таких как ракеты, спутники, мобильные телефоны, автономные мобильные роботы, в том числе дроны и мультикоптеры. Математическое моделирование динамики ММГ как составная часть процесса их разработки, является актуальной задачей.

Известно, что в режиме вынужденных колебаний чувствительного элемента ММГ служит датчиком угловой скорости корпуса прибора [1].

В данной работе выполнен анализ вынужденных колебаний чувствительного элемента микромеханического гироскопа, установленного на вращающемся основании в предположении, что угловая скорость основания постоянна и соизмерима с частотой колебаний чувствительного элемента на неподвижном основании. В качестве модели чувствительного элемента взята точечная масса, связанная с корпусом прибора двумя симметрично расположенными парами упругих пружин. При выводе уравнений принята во внимание малая нелинейность упругой характеристики подвеса.

Уравнения вынужденных колебаний чувствительного элемента относительно вращающегося корпуса представлены в виде квазилинейной системы с малыми нелинейными слагаемыми и малым гармоническим возмущением. Выполнен переход от обобщенных координат задачи к нормальным координатам, уравнения для которых в нулевом приближении по малому параметру разделяются [2].

С помощью метода осреднения для резонансного случая, когда частота возмущения близка к собственной частоте, получена система дифференциальных уравнений первого приближения для медленных амплитуд и фаз. Определены стационарные режимы колебаний, проведен анализ их устойчивости [3], рассмотрен случай медленного изменения амплитуды возмущения. Получены расчетные формулы для определения угловой скорости основания по бортовым измерениям амплитуды вынужденных колебаний чувствительной массы.

Литература

1. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009.
2. Булгаков Б.В. Колебания. М.: Гостехиздат, 1954.
3. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.

*А.С. Степанов, студ.; рук-ли И.В. Меркурьев, д.т.н., проф.;
В.В. Подалков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

ДИНАМИКА ГИРОСКОПА КАМЕРТОННОГО ТИПА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ В УСЛОВИЯХ УГЛОВОЙ ВИБРАЦИИ ОСНОВАНИЯ

Микромеханические гироскопы (ММГ) [1] находят широкое применение в составе интегрированных инерциальных спутниковых систем ориентации и навигации (ИСОН) в качестве датчиков инерциальной информации. Повышение точности гироскопических датчиков требует решения обширного ряда проблем как технологического, так и научно-исследовательского плана. Создание математических моделей движения чувствительного элемента ММГ и разработка алгоритмов компенсации погрешностей — один из путей решения этой задачи.

В настоящей работе объектом исследования является ММГ [3] (рис. 1), чувствительный элемент которого представляет собой четыре упругих стержня.

С помощью вариационного принципа Гамильтона — Остроградского и метода Бубнова — Галеркина [2] построена математическая модель движения резонатора микромеханического гироскопа. Методом двух масштабов получено решение уравнений движения чувствительного элемента ММГ на вибрирующем основании.



Рис. 1. Конструктивная схема микромеханического гироскопа с резонатором в виде упругих стержней

Исследовано влияние угловой вибрации основания на малые свободные колебания чувствительного элемента. Получена аналитическая формула для границы [2], зоны неустойчивости при параметрических колебаниях резонатора. В пространстве параметров системы построены области неустойчивости.

Литература

1. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Прикладные методы в теории колебаний. М.: Наука, 1988.
2. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009.
3. Степанов А.С., Подалков В.В., Сбытова Е.С. Динамика микромеханического гироскопа с резонатором в виде упругих стержней на вибрирующем основании // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 2 (43).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДАТЧИКА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Микромеханические гироскопы (ММГ) и микромеханические акселерометры (ММА) становятся объектами все более пристального внимания со стороны разработчиков инерциальных измерителей. Привлекательными качествами этих приборов являются чрезвычайно низкая стоимость, высокая надежность и предельно малые габариты. В последние годы на базе данных датчиков, создаются многофункциональные устройства [1].

Работа посвящена разработке конструктивной схемы и исследованию динамики миниатюрного микромеханического многофункционального (гироскоп + акселерометр) датчика (ММГА) инерциальной информации.

Предложена динамическая модель ММГА, представляющая собой упруго-массовую систему, в которой соединены элементы маятникового акселерометра и вибрационного микромеханического гироскопа. Для возбуждения первичных линейных гармонических высокочастотных колебаний инерциальной массы используется дисковый упругий биморфный пьезопреобразователь. Вторичное движение связано с угловыми колебаниями маятника, упруго закрепленного в опорной рамке с помощью торсионов, работающих на кручение. Для формирования выходных сигналов датчика использованы емкостные дифференциальные преобразователи.

В процессе численного моделирования движения чувствительного элемента исследованы динамические характеристики при постоянных и переменных параметрах линейного и углового движения основания. Следует отметить, что в режиме постоянных измеряемых параметров установившиеся вторичные высокочастотные колебания имеют постоянную составляющую, служащую мерой ускорения, и постоянную амплитуду, служащую мерой угловой скорости. В режиме переменных измеряемых параметров установившиеся вторичные колебания являются комбинацией низкочастотных и высокочастотных колебаний, амплитуды которых являются мерой амплитуд измеряемых ускорений и угловой скорости соответственно. Результаты численного моделирования могут быть оценены с помощью соответствующих соотношений, полученных методами осреднения.

Литература

1. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации // Нано-микросистемная техника. 2010. № 5.

Направление
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Научный руководитель направления —

директор ИЭЭ, д.т.н.,
чл.-корр. РАН П.А. Бутырин

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель секции — к.т.н. доцент О.Н. Кузнецов

Секретарь секции — ассистент А.Н. Шаров

О.Д. Архангельский, асп.; рук. Д.Б. Гвоздев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТАМИ

В настоящее время применяемые в электроэнергетике автоматизированные системы диспетчерского управления (АСДУ) все более усложняются, происходит интеграция автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) подстанций классов напряжения 110 — 220 кВ и 500 кВ с диспетчерскими SCADA-системами классов DMS и EMS.

В связи с указанными тенденциями, критической становится проблема обеспечения безопасности автоматизированных систем управления электроэнергетическими объектами [1]. В соответствии с положениями системного анализа, для сложных технических систем необходимо рассматривать свойства всей системы, а не только входящих в нее отдельных элементов. Поэтому наряду с оценкой надежности элементов и подсистем АСДУ, необходимо проводить также комплексную оценку рисков и анализ безопасности системы в целом [2].

В рамках диссертационной работы впервые предложена методика многофакторного анализа рисков с использованием математического аппарата теории нечетких множеств и лингвистического моделирования для сложной человеко-машинной (эргатической) системы. Данная методика позволяет учитывать не только количественные показатели риска, но и агрегировать экспертные оценки влияющих факторов и оценивать интегральный показатель уровня риска для объекта ЭЭС. В рамках разработанной методики для оценки возможных ущербов (вследствие реализации рисков) проведены исследования различных сценариев каскадных аварий в ЭЭС, разработаны математические модели для данных сценариев в программных комплексах MatLAB Power Flow и PowerWorld Simulator.

Разработана программа «Risk Analysis» в среде MatLAB, позволяющая получить интегральную оценку риска на основе нечетких входных данных.

Литература

1. **Guide** to Industrial Control Systems (ICS) Security / Keith Stouffer, Victoria Pillitteri, Suzanne Lightman et al. // National Institute of Standards and Technology (NIST)/ 2015

2. **Применение** информационных технологий для оценки уровня надежности и риска энергетических объектов / В.Г. Гольдштейн, Ю.П. Кубарьков, К.В. Ревякина, А.Ю. Рыгалов // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 5.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ НА РЕЖИМ РАБОТЫ НЕОДНОРОДНОЙ СЕТИ

Отклонения напряжения, которые возникают под влиянием различных факторов, должны соответствовать требованиям ГОСТ, чтобы достичь минимальных затрат у потребителя для производства единицы продукции.

Задачи регулирования напряжения могут решаться для потребителей с различными графиками нагрузки в разрезе суток с использованием обобщенных показателей схемы, позволяющих сопоставлять различные параметры режима при разных нагрузках в узлах до расчетов установившихся режимов и корректировать полученные данные. Например, регулирование напряжения на сторонах высшего напряжения 110 и 220 кВ осуществляется через регулирование потерь напряжения изменением потока реактивной мощности. Применение оптимальных способов и оборудования для регулирования напряжения в электрической сети способствует усилению электроэнергетических систем и повышению качества электроэнергии [1]. Поэтому на основе предварительного анализа с использованием обобщенных показателей схемы предлагается выявить наиболее значимые нагрузки для оценки изменения напряжения в узлах ЭЭС, что актуально. Практическая значимость состоит в определении влияния графика нагрузки на режим работы сети и регулирование напряжения узлов сети, что способствует повышению качества электроэнергии.

Для примера была взята наглядная неоднородная электрическая сеть, нагрузка которой имела выраженные пиковые значения. Все потоки мощности по ветвям напряжением меньше 220 кВ были переведены в шунт. Была произведена оценка разницы между собственной и суммой взаимных проводимостей для каждого узла, наибольшее значение которой в режиме наименьших нагрузок составила 0,481 %, в режиме наибольших нагрузок - 0,453 %, а разность между собственными проводимостями этого узла оказалась равной 0,028 %, что указывает на слабое влияние заданной в узле нагрузки на собственные проводимости узлов, при этом потоки мощности увеличились на 112,98 % и 115,63 %, а напряжения уменьшились на 0,97% и 0,83%. Схема осталась прежней, отличие в проводимостях в разных режимах получено за счет проводимости нагрузки, поэтому последняя разность так мала.

Литература

1. **Арзамасцев Д.А.** Модели оптимизации развития энергосистем. — Свердловск: МВиССО РСФСР, 1976. Инструкция по проектированию городских и поселковых электрических сетей. ВСН 97-83. М: Информэнерго, 1983. 64 с.

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В настоящее время нашу повседневную жизнь очень трудно представить без электроприборов, и так как электроэнергия (ЭЭ) является универсальным видом энергии и человечество возлагает в будущем на нее большие надежды, то остро стоит вопрос о потерях ЭЭ в сетях. Основными характеристиками потерь ЭЭ в сети являются потери напряжения и активной мощности. Для их снижения используются разные методы: компенсация реактивной мощности, регулирование потоков мощностей, выравнивание загрузки фаз линий, повышение уровня напряжения, оптимизация уровня напряжения [1].

Следует отметить, что каждый из вышеизложенных методов имеет свои достоинства и недостатки. Например, в наиболее используемых БСК существуют собственные потери, и они имеют отрицательный регулирующий эффект. Трехфазные стабилизаторы напряжения, используемые для выравнивания загрузки фаз, сами являются потребителями ЭЭ и являются вторичными источниками перекоса. Повышение уровня номинального напряжения является очень капиталоемким мероприятием. А оптимизация уровня напряжения требует сложной настройки и контроля при современном графике нагрузки.

В связи с этим предлагается на этапе планирования после расчета разных режимов электрической сети определить наиболее нагруженные узлы и линии. После этого путем повторного расчета с учетом расстановки БСК и регулировки РПН, найти оптимальную конфигурацию сети, при которой уровень напряжения будет обеспечивать наименьшие потери активной мощности. Данная конфигурация позволит путем небольших капиталовложений минимизировать срок окупаемости сооружения.

При повышении уровня рабочего напряжения на 5 % нагрузочные потери активной мощности снижаются примерно на 9 % от первоначального уровня, условно постоянные потери, за исключением потерь на корону, возрастают на 10 %. Но с учетом структуры технических потерь доля нагрузочных потерь значительно больше доли условно-постоянных. В сети в целом целесообразно поддерживать напряжение на предельно возможном уровне для практически любого класса напряжения.

Литература

1. Шведов Г.В., Сипачёва О.В., Савченко О.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение : учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

Д.С. Валетова, А.В. Елкин, студенты;
рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПУСТИМОЙ ПО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

В ряде задач управления электроэнергетической системой (ЭЭС) необходимо проводить оперативную оценку границ допустимой области (ДО) по условиям статической апериодической устойчивости. В условиях рыночного распределения электроэнергии в РФ задача определения допустимости режимов сложной ЭЭС является актуальной и практически востребованной.

Предварительно авторами была рассмотрена методика, где границы ДО рассчитываются через ограничения на перетоки мощностей в выделенных сечениях ЭЭС. Анализ математической модели показал, что такая аппроксимация неточно отражает истинные границы ДО. При аппроксимации имеются как случаи необоснованного «сужения» границ допустимой области в некоторых направлениях, так и случаи их «расширения» за пределы допустимого.

В работе [1] предложен метод оценки границ допустимой области ЭЭС при многокоординатных утяжелениях. Можно получить уравнения, позволяющие оценивать границу допустимой области (ДО) в гиперпространстве предельной поверхности.

Для определения $Y_{ид}$ достаточно вычислить

$$Y_{ид} = \frac{Y_{ид}(\mathbf{X})}{z_i}. \quad (1)$$

Преобразование (1) непрерывно отображает эллипсоидоподобную поверхность с крайними точками:

$$Y_{\min}^{\text{д}} = \left[Y_1(\mathbf{X}), Y_1(\mathbf{X}) \dots \frac{Y_i(\mathbf{X})}{1 \pm z_n k_{\text{ином}}} \dots Y_n(\mathbf{X}) \right]^T. \quad (2)$$

Внутренняя огибающая семейства поверхностей (2), взятых для различных точек предельной поверхности $Y_{пр}(\mathbf{X})$, образует искомую аппроксимацию границы допустимой области.

Авторами в среде MathCAD разработана компьютерная модель построения границ ДО и ее аппроксимации, с ее помощью проведен ряд вычислительных экспериментов. Результаты расчетов показали, что рассмотренный метод аппроксимации ДО применим для целей оперативного диспетчерского управления ЭЭС.

Литература

1. **Крюков А.В.** Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИРГУПС, 2012. 236 с.

*Н. Ю. Гетманова, М. Ю. Дружинин, студенты (НИУ «МЭИ»);
рук. Р. Н. Шульга, к.т.н., доц. (ФГУП ВЭИ)*

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Спроектированная и построенная к началу 90-х годов передача постоянного тока 1500 кВ мощностью 6 ГВт Экибастуз-Центр длиной свыше 2500 км [1] должна была явиться основой энергосистемы страны и послужила образцом для Китая, Индии и других стран в части развития объединенных энергосистем и создания сети постоянного тока, что является наиболее приоритетной задачей мировой энергетики [2]. Для ее разрешения требуется комплексное решение задач электротехники и энергетики в части многоподстанционных передач постоянного тока, коммутационной аппаратуры, систем управления, регулирования, защиты, автоматики (СУРЗА) и других задач.

Настоящая работа посвящена разработке методики расчета и моделирования магистральных передач постоянного тока большой мощности на базе как традиционных решений с использованием тиристоров, так и новых решений с использованием запираемых тиристоров, а также гибридных решений по комбинации преобразователей тока в виде мостов на тиристорах и преобразователей напряжения в виде СТАТКОМов с целью повышения устойчивости, управляемости и снижения стоимости подстанций.

Основной частью работы является разработка методики расчета и моделирования как установившихся, так и переходных и аварийных режимов передач постоянного тока. Если для анализа процессов в ЛЭП наиболее подходящим является программный комплекс АТР-ЕМТР или ЕМТР DC, то для подстанций с системой СУРЗА предпочтительным может оказаться программный комплекс Matlab или другой программный комплекс, поэтому выполняется аналитический обзор и выдаются рекомендации по их применению. Результатом работы является создание математической модели ППТ на полностью управляемых вентилях и рекомендуемая методика расчета и моделирования передач постоянного тока, которая может усовершенствовать учебный курс по направлениям постоянный ток и устройства FACTS.

Литература

1. **Поссе А.В.** Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1973. 302 с.
2. **Лю Чженья [Liu Zhenya.]** Электрические сети ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока: пер. с кит. А.В. Островского под ред. Ю.В. Шарова. — 2-е изд., испр. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 624 с.

*Н. Ю. Гетманова, М. Ю. Дружинин, студенты (НИУ «МЭИ»);
рук. Р. Н. Шульга, к.т.н., доц. (ФГУП ВЭИ)*

АНАЛИЗ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наша страна была мировым лидером в области постоянного тока до середины 80-х годов, построив крупнейшую в мире Выборгскую вставку постоянного тока (ВПТ) мощностью около 1,5 ГВт, которая успешно эксплуатируется в течение 35 лет и является образцом традиционных вставок большой мощности [1]. Конкурс проектов ВПТ Могоча (2004 г.) показал отсутствие отечественных схмотехнических решений и технологий для ВПТ на запираемых тиристорах (ЗТ) реализуемых на силовых полупроводниковых приборах (СПП) типов GCT, IGCT, IGBT. Если основой схмотехники традиционных ВПТ на тиристорах и фототиристорах является трехфазная мостовая схема преобразователя тока, то для перспективных ВПТ с ЗТ основными решениями являются преобразователи напряжения (ПН): трехуровневый ПН (СТАТКОМ) (ABB HVDC Light), либо цепочечная схема ПН однофазных мостов (Siemens MMC) [2]. Для ВПТ возможны вариации параллельного и последовательного соединения блоков на основе СТАТКОМ или MMC, а также их гибридные схемы. Перспективное развитие ВПТ за рубежом для связей между энергосистемами мегаполисов, связей с ВИЭ транспортных систем и др. делает задачу отработки базовых схмотехнических решений ВПТ актуальной.

Технология разработки и проектирования перспективных ВПТ предполагает координацию схмотехники приборов СПП, высоковольтных вентилях и преобразовательных блоков (ПБ). По заданным и выбранным значениям мощностей, токов и напряжений приборов анализируются варианты схмотехники ПБ на основе СТАТКОМ, MMC и их гибридных сочетаний с целью минимизации потерь, унификации и стандартизации силовых схем. На первом этапе проводится расчет и моделирование установившихся режимов, на втором — переходных и аварийных режимов на основе программ АТР-ЕМРТ. В результате была создана математическая модель ВПТ на полностью управляемых вентилях и методика выбора оптимальных решений для реконструкции энергоснабжения мегаполиса на примере Москвы, связи энергосистем Сибири и Приморья с Японией и Китаем и других объектов.

Литература

1. **Бортник И.М., Кулаков В.П.** Электротехническое оборудования для вставок постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Sood V.K.** HVDC AND FACTS CONTROLLERS: Applications of Static Converters in Power Systems. B.: Kluwer Academic Publishers, 2004.

АСУ ТП В ЭНЕРГЕТИКЕ

Автоматизированные системы контроля и управления — неотъемлемая часть любого технологического процесса. Будь то выработка электроэнергии, транзит энергоресурсов или промышленное производство.

Использование систем автоматизированного контроля и управления при осознанном подходе позволяет повысить производительность и безопасность производства, уменьшить численность обслуживающего и оперативного персонала [1].

Одной из особенностей сегодняшнего этапа развития энергетики является то, что энергосистемы вкладывают значительные средства в реконструкцию производственных мощностей. Но замена, ремонт или реконструкция основного технологического оборудования невозможна без модернизации систем управления этим оборудованием. Это является не только требованием времени, но и обязательным условием приведения системы управления технологическим процессом выработки и распределения энергии в соответствие с действующими нормативными документами. Выполнить эту задачу можно разными способами. Основной характеристикой системы автоматизации, определяющей ее структуру, состав технических средств и затрат на реализацию, является степень ее распределенности (децентрализации) [2].

Перед руководством энергопредприятия стоит необходимость выбора — между централизованной системой управления или децентрализованной. Это выбор не только технического решения, но и определение дальнейших организационных изменений в структуре предприятия.

Одним из важнейших факторов при создании автоматизированных систем являются программно-технические средства (комплекс программно-технических средств), на базе которых создается автоматизированная система.

Залогом эффективной и надежной автоматизированной системы является качественный проект. На стадии которого необходимо проанализировать возможные варианты и выбрать оптимальную структуру системы, сформировать технологическое задание на автоматизацию, разработать спецификации и задание на изготовление оборудования [2].

Литература

1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.энсop.рф/actual/articles/asu-tp-v-energetike.html>.
2. [Электронный ресурс]. URL: <http://isup.ru/articles/5/507/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ РАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ДОПУСТИМЫЕ ПЕРЕГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110/10 кВ

В настоящее время, согласно ГОСТ 14209-97 [1], при определении длительности $T_{п}$ ежедневной допустимой систематической перегрузки трансформатора график нагрузки преобразовывается в двухступенчатый график (рис. 1), с коэффициентом начальной нагрузки K_1 и коэффициентом превышения нагрузки K_2 . Использование современных ПЭВМ позволяет при решении данной задачи учитывать значительно большее число показателей графиков нагрузки и, следовательно, повысить точность расчета.

При значительном числе электроприемников рассматривают типовые графики и строят их в относительных единицах[2].

Цель работы — анализ влияния вероятностных характеристик суточных типовых графиков нагрузки потребителей трансформаторов напряжением 110/10 кВ на срок их службы с учетом длительности и величины их перегрузки.

Проведено предварительное исследование влияния различных способов уменьшения коэффициента загрузки трансформатора на нагрев обмотки (рис. 2) и срок службы трансформатора. Найдены зависимости срока службы от температуры среднего нагрева при выполнении 6-градусного правила, путем аппроксимации

$$T = -1,5K^2 - 0,5K + 1,8, \quad (1)$$

где T — срок службы изоляции; K — коэффициент загрузки.

По полученным выражениям найден относительный срок службы за характерные сутки трансформаторов при исходном графике полной мощности нагрузки — 0,34.

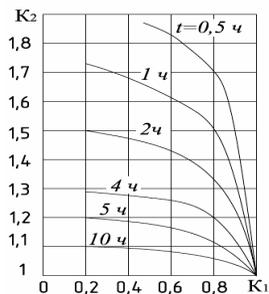


Рис. 1. Графики нагрузочной способности трехфазных трансформаторов



Рис. 2. График температуры нагрева обмотки при загрузке его полной мощностью

Литература

- ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91). Межгосударственный стандарт. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
- Конохова Е.А. Электроснабжение, М: Изд. дом МЭИ, 2014.

ОЦЕНКА ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Одним из показателей надежного функционирования электроэнергетических систем является режимная надежность, определяемая с учетом пропускной способности связей, которая может снижаться от ряда различных причин.

С технической точки зрения для обеспечения экономичности режима энергосистемы большую часть времени должны работать вблизи их физических пределов, в том числе и пределов по условиям статической аperiodической устойчивости [1]. Это в свою очередь может вызвать повышение риска нарушения устойчивости при нештатных или аварийных ситуациях, при управлении ЭЭС.

Оценить зону повышенного риска в координатах активных мощностей позволяют адаптивные коэффициенты запаса по статической аperiodической устойчивости по активной мощности $K_{зп}$, полученные с использованием обобщенных показателей режима — вторых производных от суммарных потерь активной мощности в сети π'' [2]. Анализ характера изменения вторых производных позволяет найти граничные значения активной мощности, отделяющее зону нормального функционирования от зоны около предельных режимов, вычисление коэффициентов запаса по активной мощности, соответствующих существующей ситуации, то есть адаптивных. Для этого необходимы оценка изменения π'' в сети для анализа режима и определения его статической аperiodической устойчивости, вычисления адаптивного коэффициента запаса K_p по активной мощности.

Для простейшей и реальной энергосистемы разработан алгоритм для оценки вторых производных потерь активной мощности была получена взаимосвязь между элементами матрицы Якоби для уравнений, записанных в небалансах мощности с различными способами представления нагрузки.

Литература

1. Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г. Актуальные проблемы электроэнергетики (СИГРЭ-98). // Электричество. 1997. № 4.
2. Чемборисова Н.Ш. Применение обобщенных показателей для задач управления установившимися режимами электроэнергетической системы // Электричество. 2003. № 4.

К.В. Жгун, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

РАЗРАБОТКА ФОРМАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЭС С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СЕТИ

В настоящее время при развитии и совершенствовании систем управления режимами ЭЭС необходимо использовать эффективные математические методы теории управления с учетом зависимости режимной ситуации от множества критериев, которые могут быть весьма противоречивы. Новые средства и методы управления формируют новые принципы развития эффективных систем управления ЭЭС:

- 1) оценка слабых мест и пропускных способностей связей;
- 2) повышение быстродействия алгоритмов в предаварийном и послеаварийном состояниях системы;
- 3) разработка эффективных методов и алгоритмов выбора мест приложения и дозировок управляющего воздействия.

В связи с этим целесообразно разработать алгоритм управления, построенный на выявлении таких узлов и сечений в которых управляющее воздействие будет наиболее эффективным. Для этого необходимо:

- 1) разработать метод выявления наиболее чувствительных узлов и слабых сечений на основе анализа обобщенных параметров эл. сети;
- 2) оптимизировать расстановку устройств facts и средств измерения;
- 3) построить формализованный алгоритм управления на основе информации о свойствах узлов и сечений и информации об их изменении в реальном времени и проработать особенности алгоритма для различных режимов работы энергосистемы.

Наиболее распространенным методом по выявлению сенсорных узлов является предварительный анализ матрицы узловых проводимостей и матрицы Якоби [1]. Анализ матрицы узловых проводимостей может стать начальным этапом по выявлению слабых мест в системе, что позволяет провести предварительное ранжирование узлов по степени их жесткости. При подготовке к расчету этот метод реализуется в два раза быстрее, чем подготовка к расчету режима. Вычисления в программном комплексе ранжированного списка узлов происходит в 10 раз быстрее расчета режима, также необходимо учитывать, что режим может и не «сойтись», даже если он вполне реализуем.

На базе предлагаемого подхода выстроен формализованный алгоритм, на основе которого можно эффективно управлять режимом ЭЭС.

Литература

1. **Воропай Н.И., Гамм А.З.** Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 256 с.

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ

При локационном зондировании воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) в условиях образования гололедных отложений на проводах возникают дополнительные затухания и запаздывания отраженных локационных сигналов. При этом общее гололедное влияние может быть представлено в виде суммы «механического» и «диэлектрического» влияний. Первое из них обусловлено удлинением проводов под действием возникающих механических нагрузок, а второе — изменением диэлектрических характеристик среды, окружающей провода.

Удлинение проводов рассчитывается по известным методикам допустимого напряжения согласно ПУЭ. Однако оценочные расчеты показывают, что «механическое» влияние составляет менее 10 % от общего влияния, поэтому в первом приближении «механическим» влиянием можно пренебречь.

При рассмотрении «диэлектрического» влияния используется модальная модель теории распространения электромагнитных волн по многопроводным ВЛЭП, по которой затухание и запаздывание сигналов увеличиваются при образовании гололедных отложений в основном за счет основной моды. Для

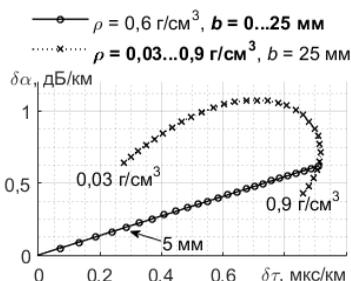


Рис. 1. Влияние вариации толщины эквивалентной стенки b (0–25 мм) и плотности ρ (0,03–0,9 г/см³) гололедных отложений на погонные затухания $\delta\alpha$ и запаздывания $\delta\tau$ локационных сигналов

описания диэлектрических характеристик гололедных отложений в зависимости от частоты сигналов, температуры и плотности отложений используются уравнения Дебая, экспоненциальные зависимости времени релаксации от температуры и уравнение Винера соответственно.

Полученная модель (рис. 1) влияния гололедных отложений на распространение локационных сигналов используется для решения обратной задачи — оценки толщины и плотности гололедных отложений на проводах по изменениям затухания и запаздывания локационных сигналов с целью предупреждения гололедных аварий на ВЛЭП.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках гранта № 15-48-02243.

Д.Н. Кормилицын, асп.; рук. В.П. Голов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

В известных работах по исследованию устойчивости простейших электроэнергетических систем, содержащих управляемые устройства компенсации, исследуется влияние только одного типа устройств на устойчивость [1—3]. Однако совместное влияние управляемых устройств продольной и поперечной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы также представляет интерес.

Произведена оценка влияния совместного регулирования управляемого устройства продольной компенсации (УУПК) и управляемых шунтирующих реакторов (УШР), установленных на его выводах. Проведенные исследования показывают, что совместное регулирование параметров УУПК и УШР позволяет увеличить пропускную способность линии электропередачи, оснащенную подобными устройствами при положительном влиянии на статическую аperiodическую и динамическую устойчивость системы.

При использовании регулируемого УПК не наблюдается колебательно-го нарушения устойчивости во всех возможных режимах и диапазонах регулирования со степенью компенсации, применяемой при эксплуатации ЭЭС при соответствующем выборе законов управления УПК.

Предложена методика расчета диапазона изменения параметров регулирования УУПК и УШР, при которых наблюдается положительный эффект влияния данных устройств на устойчивость исследуемой ЭЭС, а именно увеличение предела передаваемой мощности, улучшение аperiodической статической устойчивости, и отсутствует отрицательное влияние, т.е. не наблюдается колебательно-го нарушения устойчивости ЭЭС, вызванного самим законом регулирования УПК.

Литература

1. **Фокин В.К.** Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС — «Новокузнецкая», «Кузбасская» // Энергия единой сети. 2013. № 2 (7). С. 66—73.
2. **Маслеников В.А., Устинов С.М.** Динамические свойства и статическая устойчивость дальних электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Изв. РАН Энергетика. 1999. № 3. С. 6878.
3. **Карташев И.И., Строев В.А., Шаров Ю.В.** Научные исследования кафедры электроэнергетических систем // Вестник МЭИ. 2014. № 1. С. 30—34.

*В.В. Коробка, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ И МЕТОДА КОНТУРНЫХ ТОКОВ ПРИ РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ ЭЭС

Задачей расчета установившегося режима электроэнергетических систем является определение таких параметров режима, как напряжения в узлах и токи (мощности) в ветвях системы. На практике при расчетах режимов ЭЭС удобно использовать метод узловых потенциалов (МУП), который позволяет сократить количество уравнений по сравнению с методом составления уравнений Кирхгофа, но усложняет расчет. Таким образом при решении системы уравнений, составленных по методу узловых потенциалов, получают потенциалы всех узлов системы относительно базисного узла. Для определения токов в ветвях необходимо использовать закон Ома для участка цепи [1]. При большом количестве узлов в системе вычисления проводят на ЭВМ. Стоит также отметить, что метод целесообразно применять в тех случаях, когда число узлов системы меньше или равно числу независимых контуров этой системы.

При расчетах токов короткого замыкания необходимо знать значение тока в месте короткого замыкания. В этом случае необходимо пользоваться методом контурных токов (МКТ). Решая систему уравнений, составленных для независимых контуров системы, получают значения контурных токов, по которым в дальнейшем определяются реальные токи ветвей. Целесообразность использования МКТ определяется числом независимых контуров в системе. Мы выяснили, что в сетях номинального напряжения 110 кВ и выше количество контуров возрастает примерно в 2 раза, так как схемах замещения ЛЭП появляются поперечные емкостные составляющие. Это позволяет нам утверждать, что МКТ удобно применять при расчете токов КЗ систем, номинальное напряжение которых 35 кВ и ниже. В сетях 110 кВ и выше применение МКТ нецелесообразно из-за увеличения объема расчетов более чем в 2 раза.

Таким образом, для решения различных задач, связанных с расчетами режимов ЭЭС, нужно стремиться к совместному применению методов МКТ и МУП при учете рациональности использования этих методов.

Литература

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чепурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3 т.: учебник для вузов. Том 1. — 4-е изд. СПб., 2003. 463 с.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ

К настоящему времени около 50 % сетевого оборудования имеет срок службы от 30 до 50 лет. При этом доля оборудования со сроком службы менее 10 лет составляет 15 % [1]. Такая картина наблюдается по трансформаторам мощностью 63 МВА и более и классом напряжения 110 кВ и выше, воздушным линиям, а также по генерирующему оборудованию. В результате старения оборудования наблюдается снижение надежности электроснабжения потребителей.

Для оценки надежности электроснабжения потребителей необходимо знать показатели надежности отдельных элементов электрической сети, а также законы изменения их интенсивностей отказов во времени. На основе обзора существующих исследований [2] получено, что для оценки надежности основного оборудования можно воспользоваться распределением Вейбулла, за исключением релейной защиты и автоматики. Для всех видов оборудования характерно резкое повышение удельной повреждаемости на сроках эксплуатации более 25 лет, что обусловлено фактором старения оборудования.

На основе отдельных характеристик старения основного оборудования получены суммарные характеристики изменения надежности электроснабжения потребителей. Показано резкое ухудшение показателей надежности при наличии в сети большого количества оборудования со сроком эксплуатации, превышающим нормативный.

Для простейшей системы напряжением 110 кВ, состоящей из генератора, линии и двух трансформаторов получено, что среднее время наработки на отказ (\bar{t}) в период старения оборудования снижается по сравнению с периодом нормальной работы в среднем в 1,2—2 раза каждые 5 лет. Для нормального срока эксплуатации \bar{t} составляет 9,2 года; для системы, отработавшей 30 лет, $\bar{t} = 8$ лет; 35 лет — срок эксплуатации составляет $\bar{t} = 6$ лет; 40 лет — $\bar{t} = 3,5$ года.

Литература

1. **Кочуров С.Н.** Для чего нужна оценка технического состояния оборудования// Энергоэксперт. 2015. № 1.
2. **Непомнящий В.А.** Надежность работы элементов электрических сетей 1150-35 кВ// Энергоэксперт. 2012. № 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110—220 кВ

Вопросы оптимального использования электрической энергии и повышения экономичности работы электроустановок были актуальны во все времена. Компенсация реактивной мощности (выработка реактивной мощности на местах) позволяет добиться существенных результатов: нормализовать уровни напряжений, снизить потери электроэнергии, повысить режимную устойчивость распределительных электрических сетей, увеличить число электропотребителей [1].

В основу данной работы был положен наиболее простой и наглядный метод пошаговой итерации [2]. Выбор оборудования предлагается проводить с учетом реально существующих суточных и годовых графиков нагрузки. Используя их данные, можно выделить постоянную составляющую и переменную реактивной мощности, требующую компенсации. При таком подходе можно разделить и выбираемое оборудование на постоянно введенное в работу, оборудование с автоматическим управлением и управляемое оперативным персоналом. Разделение таким образом оборудования приведет к снижению его стоимости, а следовательно, положительно скажется на экономических показателях всей электросети.

В качестве примера данная методика была применена к участку реально существующей сети. Результаты показали снижение стоимости устанавливаемого оборудования примерно на 40 % по сравнению с методом оптимизации расстановки компенсирующих устройств без учета выбора оборудования различного типа. Это является подтверждением целесообразности использования данного подхода при решении вопросов оптимизации режимов работы уже существующих электрических сетей.

На примере проведенных расчетов установлено, что использование данного метода может привести к снижению затрат на эксплуатацию электрических сетей.

Литература

1. **Ковалев И.П., Осипов М.А.** Относительное снижение затрат в энергосистеме при оптимизации плотности тока и компенсации реактивной мощности // Электричество. 2001. № 10.
2. **Нешатаев В.Б.** Оптимальный выбор источников реактивной мощности в системах распределения электрической энергии. Красноярск, 2012.

А.П. Макаров, Д.С. Зарудин, И.А. Сенчев, студенты;
рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Одна из важнейших задач управления энергосистемами состоит в обеспечении статической устойчивости (СУ) нормальных и послеаварийных режимов. От корректности расчетов СУ зависит уровень надежности работы ЭЭС и пропускная способность электрических сетей [1]. Также представляет большой интерес расчет предельных режимов для задач оперативного управления ЭЭС. Для повышения эффективности управления системой в задачах оперативного управления требуется проведение дополнительных исследований [2].

Целью исследования является анализ методов, повышающих скорость расчета уравнений установившихся режимов (УУР) и уравнений предельных режимов (УПР) для применения их в цикле оперативного управления ЭЭС.

В процессе исследования получена компьютерная модель, и по ней экспериментально выявлены особенности решения УПР, предложены рациональные приемы, позволяющие увеличить скорость и надежность получения результата. Выявлено, что применение полярных координат УУР предпочтительно при решении задач противоаварийного управления, а декартовы координаты — задач анализа несимметричных режимов.

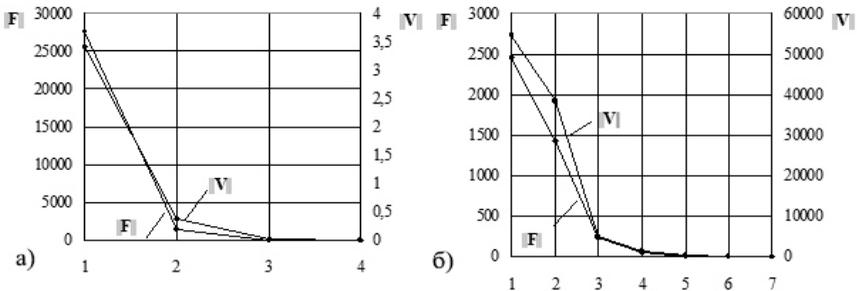


Рис. 1. Влияние координат, применяемых для записи УУР, на сходимость вычислительных процессов решения УПР (схема ЭЭС 12 узлов):
a — декартовы координаты; *б* — полярные координаты

Литература

1. Крюков А.В. Пределные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 236 с.
2. Крюков А.В., Сенько В.В. Расчеты предельных режимов электроэнергетических систем для целей оперативного управления // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 21—23.

*Д.В. Медведев, студ.; рук. Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ

Электрическая энергия является единственным видом продукции, для перемещения которого от мест производства до мест потребления не используются другие ресурсы. Для этого расходуется часть самой передаваемой электроэнергии, поэтому потери ее неизбежны.

Вопрос снижения потерь стоит очень жестко, уменьшая потери в сети можно экономить миллионы рублей в год, что безусловно важно в условиях рыночных отношений. Но всегда необходимо оценивать экономическую целесообразность различных мер, ведь вложив много средств в самые современные решения, можно не получить взамен ничего.

Этой проблеме не уделялось должного внимания. По данным ПАО «НТЦ ФСК ЕЭС» потери электроэнергии составляют 13,6 % отпуска в день, хотя согласно Приложению 3 к «Энергетической стратегии до 2030 года» потери электроэнергии должны быть не более 8 % отпуска в сеть [1], поэтому задача снижения потерь актуальна на сегодняшний день.

Предлагаются такие методы снижения потерь как оптимизация расстановки компенсирующих устройств и повышение однородности сети. На перспективу эти задачи могут решаться с использованием обобщенных показателей схемы. При этом оценочные расчеты могут проводиться до расчетов режимов, это существенно сокращает объем необходимых вычислений [2]. Последний метод достаточно новый и мог бы найти широкое применение в сетях.

Указанные методы дали снижение потерь в простейшей рассматриваемой сети, оптимизация расстановки компенсирующих устройств дала снижение потерь на 1,6 %, а повышение однородности снизило потери на 2,48 %, они достаточно просты, перспективны и не требуют больших затрат.

Литература

1. **Воротницкий В.Э., Туркина О.В.** Сравнительный анализ потерь электрической энергии в электрических сетях Российской Федерации и стран дальнего зарубежья. Оценка резервов снижения потерь электрической энергии в электрических сетях Российской Федерации [Электронный ресурс] // ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» [Офф. Сайт]. URL: http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Prezентация_Vorotnitskiy_Turkina.pdf (дата обращения: 21.09.2015).

2. **Чемборисова Н.Ш.** Влияние неоднородности сети на снижение потерь активной мощности. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент. 2014. № 3.

А.Н. Рожков, асп.; рук-ли Д.И. Панфилов, д.т.н., проф.;
М.А. Новиков, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОММУТАТОРОМ

Предложен способ реализации управления режимами работы в энергосистеме, основанный на использовании фазоповоротного устройства (ФПУ) с полупроводниковым коммутатором [1].

Разработан регулятор и проведен анализ структуры построения его программно-аппаратного обеспечения, входящего в систему управления ФПУ. Регулятор позволяет формировать управляющее воздействие на ФПУ в зависимости от реализации требуемых режимов работы энергосистемы. Рассмотрено применение ФПУ для реализации трех режимов работы энергосистемы: а) перераспределение потоков мощности в энергосистеме; б) ограничение тока в линии; в) минимизация потерь в выбранных линиях электропередачи.

Проведен анализ структур построения и алгоритмов работы функциональных блоков регулятора, формирующих управляющие воздействия на ФПУ для реализации соответствующих режимов работы энергосистемы: режим перераспределения потоков мощности в энергосистеме реализуется под внешним управлением ФПУ; режим ограничения тока реализуется специальным функциональным блоком регулятора, использующим двухмашинную модель энергосистемы и адаптивный алгоритм управления; формирование управляющих воздействий на ФПУ для реализации режима минимизации потерь основывается на использовании таблиц.

Предложена модель ФПУ с полупроводниковым коммутатором и системой управления, интегрированная в 39-шинную IEEE модель энергосистемы, объединяющую 10 генераторов и 22 потребителя энергии. В дальнейшем расчет установившихся режимов работы энергосистемы при различных управляющих воздействиях проводился в среде PSCAD. Рассчитаны управляющие воздействия регулятора для реализации требуемых режимов работы энергосистемы.

Проведен расчет режимов работы 39-шинной модели энергосистемы в среде RastWin при соответствующих заданных управляющих воздействиях на ФПУ. Совпадение режимов работы энергосистемы, рассчитанных в разных средах моделирования, подтвердило работоспособность разработанной структуры регулятора ФПУ и его функциональных блоков.

Литература

1. **Стельников В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н.** Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Электротехника. 2014. № 1.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (БЕНЧМАРКИНГ) ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЙ

В условиях существующей системы экономических отношений в электроэнергетике крайне важным инструментом для стратегического управления и планирования развития бизнеса становится бенчмаркинг — комплексная оценка эффективности функционирования компаний и их подразделений. Бенчмаркинг позволяет максимально объективно оценить эффективность деятельности как компании в целом, так и ее отдельных подразделений. Актуальность подобного анализа для электросетевых компаний обусловлена необходимостью обеспечения надежного снабжения потребителей электроэнергией требуемого качества в условиях значительного износа производственных фондов и одновременного действия тарифных ограничений на величину необходимой валовой выручки, что снижает инвестиционную привлекательность компаний.

Существующие подходы к сравнению электросетевых компаний и отдельных их подразделений (единиц производства) [1] базируются в основном на анализе финансовой составляющей функционирования и не учитывают технические особенности эксплуатации электрических сетей. Целью настоящего исследования является комплексное сравнение единиц производства по эффективности производственной деятельности, учитывающей ряд технических и финансовых показателей (операционные затраты, а также величины, характеризующие надежность электроснабжения и качество электрической энергии).

В рамках исследования автором был сформирован ряд показателей сравнения, для вычисления которых анализировались данные статистической отчетности единиц производства и использовались методы расчета надежности электроэнергетических систем, их режимов и показателей качества электрической энергии. Оценка эффективности единиц производства с дальнейшим их ранжированием оценивалась по интегральному показателю, расчетная формула для которого также была определена в ходе исследования и учитывает описанные выше финансовые и технические показатели функционирования. По полученным результатам был предложен ряд мероприятий по повышению частной эффективности единиц аутсайдеров по соответствующим показателям.

Литература

1. **P. Agrell, P. Bogetoft.** International Benchmarking of Electricity Transmission System Operators. e³GRID Project // Final Report Brussels, SUMICSID SPRL, 2009.

*М.О. Сухова, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»);
науч. конс. М.А. Калинин, к.т.н. (НТЦ ФСК ЕЭС)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ЗА СЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Важнейшим показателем экономичности работы электрических сетей являются потери электроэнергии. Эффективным мероприятием по снижению потерь электроэнергии при ее передаче является развитие систем регулирования напряжения и реактивной мощности [1]. Данное развитие должно основываться на широком использовании автоматических систем управления с непрерывной оценкой изменения нагрузки в сети и корректировкой настройки средств регулирования.

Уровень рабочего напряжения существенно влияет на значение потерь электроэнергии. Однако определение эффекта от регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в сети значительно усложняется при учете статических характеристик нагрузки. С одной стороны, увеличение уровня напряжения приводит к уменьшению нагрузочных потерь мощности, с другой стороны — к увеличению потребляемой мощности, а следовательно, к росту потерь мощности. Крутизна статических характеристик нагрузки влияет на изменение величины нагрузочных потерь. Таким образом, рост напряжения в сетях с резкими СХН приводит к увеличению нагрузочных потерь. В связи с этим возникает задача определения рационального уровня напряжения в электрической сети с различными типами электрических нагрузок, соответствующего минимизации суммарных потерь активной мощности и электроэнергии.

В данной работе на тестовой схеме с использованием программного комплекса РТП 3 рассчитываются технические потери мощности и электроэнергии при различных уровнях напряжения, производится их оценка в относительных и именованных единицах. На этом основании разрабатывается алгоритм выбора настроек средств регулирования напряжения и реактивной мощности.

Результаты расчетов на тестовой схеме показали, что регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности совместно с учетом статических характеристик нагрузки приводит к оптимизации режима и уменьшению суммарных потерь активной мощности на 5 %, что дает лучший результат при переводе значения потерь в именованные единицы.

Литература

1. Каргашев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 354 с.

*Е.О. Тихомиров, Л.В. Мелешкова, А.В. Назарова, студенты;
рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц. (СамГТУ, г. Самара)*

ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Оперативное управление электроэнергетической системой (ЭЭС) требует разработки новых методов и алгоритмов оценки статически устойчивых режимов [1]. В этой связи особую актуальность имеют задачи исследования границ как самой области устойчивости (ОУ), так и области допустимых режимов.

Целью данного исследования является развитие численных методов решения модифицированных уравнений предельных режимов (УПР) [2], которые позволяют получать значения допустимых режимов, отвечающих нормативным значениям запаса статической устойчивости (СУ).

Задачи исследования решались на основании математического моделирования режимов ЭЭС с использованием аппарата матричной алгебры, основ функционального анализа и компьютерного моделирования [3].

Авторами в среде Mathcad была разработана учебная компьютерная модель расчета предельных режимов системы в наиболее опасном направлении утяжеления и расчета допустимых режимов. С помощью этой модели были проведены вычислительные эксперименты сходимости итерационных расчетов при построении границ допустимой области (ДО).

Результаты расчетов доказали, что для улучшения сходимости итерационных процессов в задачах построения границ ДО целесообразно применение модификации метода Ньютона, основанной на ограничении длины шага, а также использование специальных стартовых алгоритмов.

Разработанные авторами алгоритмы и компьютерная модель используются в учебном процессе СамГТУ и могут быть полезными для специалистов, занимающихся анализом статической аperiodической устойчивости ЭЭС.

Литература

1. **Андерсон П, Фуад А.** Управление энергосистемами и устойчивость: пер. с англ. / под ред. Я.Н. Лугинского М.: Энергия, 1980. 568 с.
2. **Крюков А.В.** Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 236 с.
3. **Крюков А.В., Сенько В.В.** Расчеты предельных режимов электроэнергетических систем для целей оперативного управления // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 21—23.

ПЕРЕДАЧА ПОСТОЯННОГО ТОКА КАК ЧАСТЬ АВТОМАТИКИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Среди положительных аспектов передач постоянного тока (ППТ), выполненных на преобразователях напряжения (ПН) [1], можно отметить их высокое быстродействие в изменении их режимных параметров, а также независимое регулирование активной и реактивной мощностей. Из этого вытекает идея изменения режима ППТ как управляющего воздействия для целей противоаварийного управления [2, 3]. На сегодняшний день данный вопрос требует проработки.

В программной среде MATLAB разработана модель энергосистемы «Генератор — Шины бесконечной мощности (ШБМ)», содержащей ППТ на ПН (рис. 1). Выведены принципы регулирования активной и реактивной мощности данной ППТ для предотвращения нарушения устойчивости системы. Сформулирован подход к учету данного управляющего воздействия в алгоритме расчета системы противоаварийной автоматики.

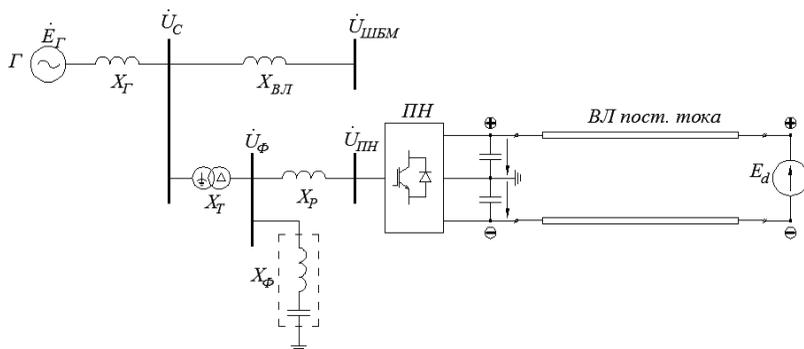


Рис. 1. Схема исследуемой энергосистемы

Литература

1. Amirnaser Yazdani, Reza Iravani. Voltage-Sourced Converters in Power Systems. Modelling, Control, and Applications // A John Wiley & Sons, Inc. 2010. 473 p.
2. Гущина Т.А., Кощеев Л.А., Шлайфштейн В.А. Вопросы управления мощностью передач постоянного тока от системы противоаварийной автоматики. // Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений. Сборник научных трудов НИИПТ. 1994.
3. Кац П.Я., Эдлин М.А. и другие // Известия НТЦ ЕЭС. Сборник научных трудов. 2013. № 1 (68).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ РАЗГРУЗКИ ТУРБИНЫ НА УСЛОВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС

В качестве одного из основных видов управляющих воздействий (УВ) в противоаварийной автоматике (ПА) используется импульсная разгрузка турбины (ИРТ). ИРТ применяется для уменьшения момента, создаваемого турбиной и, как следствие, ускорения ротора агрегата на начальной стадии переходного процесса, вызванного аварийным возмущением, и позволяет не отключать агрегат от сети, что существенно повышает надежность электроснабжения [1].

Для обеспечения надежной работы ЭЭС необходима установка ПА на агрегатах электростанций. Поэтому требуется проведение комплекса мероприятий по внедрению ИРТ на всех строящихся, а также на всех действующих агрегатах электростанций России, что определяет актуальность выбранной темы.

В работе составлен алгоритм расчета электромеханического переходного процесса с учетом ИРТ [2]. ИРТ реализуется в двух режимах: с возвратом на исходный уровень мощности и с последующим фиксированным ограничением мощности.

Исследовано влияния глубины (ΔP) и скорости (dP/dt) разгрузки турбины и длительности работы в разгруженном состоянии ($t_{\text{п}}$) на условия динамической устойчивости в двух случаях: $\Delta P \cdot dP/dt = \text{const}$ и $\Delta P \cdot t_{\text{п}} = \text{const}$. Результаты показали, что в первом случае при разгрузке агрегатов более чем на (45—50) % предел передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости будет выше при больших скоростях разгрузки турбины. Во втором случае при условии того, что $t_{\text{п}} > (3 \div 4)$ с большее влияние на предел передаваемой мощности оказывает величина ΔP . Например, при $t_{\text{п}} = 4,25$ с и $\Delta P = 0,8P_{\text{ном}}$ предел по динамической устойчивости будет выше, чем при $t_{\text{п}} = 6,8$ с и $\Delta P = 0,5P_{\text{ном}}$.

В работе детально исследовано влияние параметров ИРТ на условия динамической устойчивости ЭЭС, что позволит выбрать рационально номограммы ИРТ.

Литература

1. **Электрические системы:** Управление переходными режимами электроэнергетических систем / В.А. Веников, Э.Н. Зуев, М.Г. Портной и др.: учебник / под ред. В.А. Веникова. М.: Высш. школа, 1982. 247 с., ил.
2. **Строев В.А., Шаров Ю.В., Кузнецов О.Н.** Алгоритмы расчета установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетической системе: Курс лекций. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 84 с.

*А.И. Чуркин, И.Р. Сулейманов, студенты; рук. Р.Р. Насыров, к.т.н.
(НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ НА СОВРЕМЕННОМ ОПЕРАТИВНО-ИНФОРМАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ

В настоящее время непрерывно ведутся разработки и усовершенствования автоматизированных систем диспетчерско-технологического управления. Однако надежность работы единой электроэнергетической системы значительно зависит от уровня подготовки персонала всех уровней иерархии оперативно-диспетчерского управления [1]. Снижение уровня аварийности возможно за счет постоянного повышения квалификации оперативного персонала, совершенствования обучающих методик, проведения регулярных тренировок. Одним из основных инструментов подготовки диспетчеров являются различные программно-технические комплексы, в том числе тренажеры диспетчеров. Проблематика подготовки диспетчерского персонала состоит в том, что она в большей мере происходит на рабочем месте, а не в институте или техникуме. Это увеличивает время подготовки и требует дополнительных ресурсов предприятия [2]. Существующие в системе высшего и среднего профессионального образования специализации по оперативно-диспетчерскому управлению требуют расширения и дополнения, так как они не касаются вопросов оперативных переключений, обработок заявок на вывод оборудования в ремонт и т.д.

На кафедре электроэнергетических систем НИУ «МЭИ» было принято решение приступить к разработке новой дисциплины по диспетчерскому управлению в электроэнергетике. Авторами описана компетентностная модель диспетчера, разработаны четыре лабораторные работы, охватывающие основные задачи диспетчеров и обучающие работе с программным комплексом. Создаваемая дисциплина диспетчерского управления подразумевает использование современного оперативно-информационного комплекса при обучении студентов, что позволит значительно расширить их знания в области диспетчерского управления и в дальнейшем упростить подготовку оперативно-диспетчерского персонала.

Литература

1. **Березин А., Фишер В.** Развитие Smart Grid «Новый вызов для автоматизированных систем управления электрическими сетями» // «Электроэнергия. Передача и распределение». 2012. № 5 (14).
2. **Варламова Е.В., Третьяков В.П.** О концепциях человеческого фактора в обеспечении надежности энергообъектов // «Оперативное управление в электроэнергетике». 2007. № 2.

*К.А. Шуварикова, студ.; рук. Г.К. Зарудский, к.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОТЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 220 кВ С КОМПАКТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ

Строительство воздушных линий компактного исполнения становится все более востребованным [2]. За счет применения воздушных линий с компактной конструкцией в сочетании с современными управляемыми техническими средствами, можно достигнуть увеличения пропускной способности в 1,2-1,6 раза по сравнению с традиционными передачами [1]. На территории Российской Федерации эксплуатируются воздушные линии и силовое электрооборудование классов номинального напряжения, относящихся к двум исторически сложившимся системам: 10/220/500 кВ и 150/330/750 кВ. Пропускная способность обычных ВЛ 220 кВ, оцениваемая по натуральной мощности, примерно в 7 раз ниже, чем у ВЛ 500 кВ [3]. Поэтому для передачи наибольших мощностей в диапазоне от 400 до 600 МВт приходится сооружать ВЛ 500 кВ, работающие затем недогруженными с повышенными напряжениями. В этой ситуации становится актуальным проектирование, сооружение и освоение ВЛ 220 кВ повышенной пропускной способности [2].

В исследовании была проведена серия расчетов оптимизационного характера для выявления наиболее выгодных характеристик сочетания работы устройства продольной компенсации (УПК) с управляемыми шунтирующими реакторами (УШР). Рассмотрены также экологические аспекты применения воздушных линий компактного исполнения.

Проведенное исследование показывает, что применение продольной емкостной компенсации совместно с управляемыми шунтирующими реакторами позволяет увеличить предельную протяженность линии 220 кВ компактного исполнения с 400 до 600 км и увеличить передаваемую мощность при трех-, четырехцепном исполнении до 450-600 МВт, не переходя на более высокий класс напряжений с учетом необходимых технических ограничений.

Литература

1. **Макарова Л.** Компактные ВЛ: качественно, надежно, экономно // Воздушные линии. 2012. № 2.
2. **Компактные** воздушные линии электропередачи / Коллектив авторов ФСК ЕЭС // URL: http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/compact_power_line
3. **Зевин А.А.** Повышение эффективности электросетевого строительства. Под ред. Н.Н. Тиходеева. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

А.С. Щепотин, студ.; рук. Д.В. Саленик, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ В ОПРЕДЕЛЕННЫХ УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В схемах с большим числом узлов расчет режима требует большого объема вычислений, памяти и времени. Часто требуется рассчитать напряжение только в определенных узлах нагрузки.

Предложенный в работе метод позволяет получить напряжения только в интересующих узлах для распределительных сетей низкого напряжения. При этом значительно сокращается объем вычислений.

При использовании обобщенных параметров сети [1] напряжения в узлах вычисляются методом матрицы узловых сопротивлений по схеме:

$$\mathbf{Z}_y = \mathbf{C}^T \mathbf{Z}_B \mathbf{C}; \quad \mathbf{V}_\Delta = \mathbf{Z}_y \mathbf{J}; \quad \mathbf{V}_y = \mathbf{V}_6 - \mathbf{V}_\Delta,$$

где матрицы \mathbf{Z}_y — узловых сопротивлений; \mathbf{C} — коэффициентов распределения токов; \mathbf{Z}_B — сопротивлений ветвей; \mathbf{V}_Δ — напряжений узлов; \mathbf{J} — задающих токов; \mathbf{V}_y — напряжений в узлах; \mathbf{V}_6 — базисных напряжений.

При расчете сетей низкого напряжения пренебрегают зарядными мощностями линий электропередачи. Это упрощает расчет и позволяет определять напряжения в конкретных узлах схемы. Для этого вычисляются необходимые строки матрицы \mathbf{Z}_y путем выделения соответствующих строк и столбцов матриц \mathbf{C}^T и \mathbf{C} и умножения их на элементы матрицы \mathbf{Z}_B :

$$z_{y_{kj}} = \sum_i c_{ki} z_{B_{ii}} c_{ij}; \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k \text{ — заданный угол нагрузки}).$$

С учетом того, что распределительные сети чаще имеют разомкнутые схемы, составление матрицы \mathbf{C} по схеме сети не вызывает затруднений.

Предложенный метод нахождения матрицы \mathbf{Z}_y позволяет также определять сопротивления точек короткого замыкания интересующих узлов, не вычисляя все элементы матрицы \mathbf{Z}_y .

Данный метод позволяет значительно сократить объем вычислений при проведении расчетов напряжения в конкретных узлах сети номинального напряжения до 35 кВ, а также при выполнении расчетов сопротивлений короткого замыкания в интересующих точках. При проведении 5-6 итераций, в ходе которых уточняются значения задающих токов, достигается точность напряжений порядка десятых долей процента.

Литература

1. Холодильни Д.Г., Саленик Д.В. Определение обобщенных параметров схем сети с помощью метода псевдообращения матриц / Радиоэлектроника, электротехника, энергетика: Двадцатая междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

*М.Р. Ярулин, м.н.с; рук. Р.Г. Минуллин, д. ф.-м. н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)*

УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Своевременное предупреждение об опасности возникновения гололедных отложений сверх нормативных значений является наиболее эффективным способом предотвращения гололедных аварий на линиях электропередачи (ЛЭП).

Сотрудниками КГЭУ предложено использовать локационное зондирование для обнаружения гололеда на проводах ЛЭП. Метод позволяет судить о наличии и количестве гололеда на проводах ВЛЭП по изменению условий распространения широкополосных импульсных сигналов по проводам ЛЭП. Устройство обнаружения гололеда на проводах линий электропередачи локационным методом позволяет контролировать 16 линий электропередачи по всей длине одним устройством, обеспечивает контроль плавки гололедных отложений и т.д.

Испытания данного устройства показали, что при локационном зондировании большая часть энергии спектральных составляющих широкополосного прямоугольного видеоимпульса теряется в узкополосном высокочастотном тракте воздушных линий электропередачи при прохождении его элементов: фильтра присоединения, высокочастотного заградителя и ЛЭП.

Поэтому было принято решение усовершенствовать устройство локационного зондирования путем использования в его составе генератора сигналов специальной формы и разработать программный продукт, обеспечивающий его надежное функционирование.

В качестве генератора сигналов специальной формы был выбран генератор Bordo B-332. Программное обеспечение реализовано для операционных систем Windows XP/7/8 в среде «Visual Studio 2013» на языке C#.

В программном обеспечении локационного устройства реализованы следующие способы формирования сигналов: путем задания основных параметров одного из стандартных сигналов, аналитически, с помощью математических формул и библиотеки функций, чтением из памяти ранее сформированных/запомненных сигналов (в том числе, зарегистрированных цифровым осциллографом, задаваемых в ASCII коде и т.п.)

Исследования осуществлены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках гранта № 15-48-02243.

Секция 51

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Председатель секции — к.т.н., доцент Г.В. Шведов
Секретарь секции — ст. преподаватель С.А. Фахриева

С.Н. Анисимов, студ.; рук. Г.П. Корнилов, д.т.н., проф.
(МГТУ, г. Магнитогорск)

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время синхронные двигатели (СД) являются существенным потребителем электроэнергии на металлургических предприятиях. СД прокатных станов обладают потенциалом в направлении экономии электроэнергии. Значительная часть их потерь приходится на обмотку возбуждения, таким образом, имеется возможность уменьшения потерь без внесения изменений в конструкцию двигателя. Этого можно достичь точной настройкой автоматического регулятора возбуждения в соответствии с требованиями технологического процесса. Регулирование происходит путем суммирования сигналов от измеряемых параметров (многоканальные параллельные системы) или расстановки приоритета между параметрами. Для СД, обладающих большой инерционностью, необходимо учитывать вопросы формирования переходных процессов при набросе нагрузки.

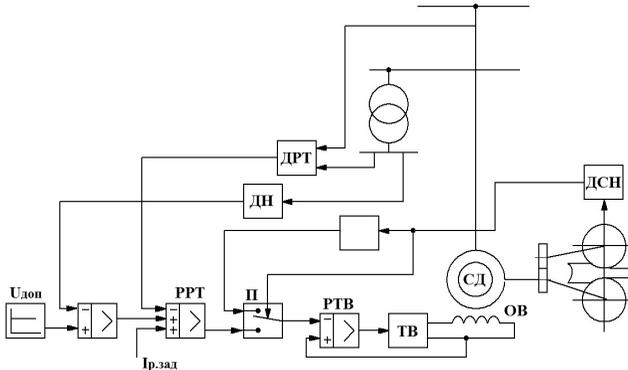


Рис. 1. Структурная схема системы АРВ

Поэтому для СД с резкопеременной нагрузкой также учитывается демпфирование колебаний ротора [1].

Для разработки закона регулирования возбуждения на примере СД мощностью 7 МВА, установленного на прокатной клети стана горячей прокатки ОАО «ММК», используется программное обеспечение MatLab с пакетом Simulink .В результате применения данного регулирования можно уменьшить себестоимость единицы готовой продукции путем уменьшения затрат на электроэнергию.

Литература

1 **Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов. М.: Академия, 2004. 576 с.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ МЕСТАХ НАХОЖДЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ВЫБРОСЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Одной из актуальных проблем электросетевого хозяйства крупных и крупнейших городов является значительная доля кабельных линий с продолжительным сроком эксплуатации. Мониторинг технического состояния сетей показал, что в распределительных кабельных сетях г. Москвы преобладает физически и морально устаревшее маслонаполненное оборудование и кабели напряжением 6 и 10 кВ с бумажной пропитанной маслосиликоновой изоляцией, со сроком эксплуатации 25 и более лет. Вследствие этого фиксируется все больше коротких замыканий из-за физического износа изоляции кабельных линий.

В крупных и крупнейших городах для прокладки кабельных линий используются различные кабельные сооружения. Одним из таких подземных сооружений являются кабельные колодцы, вход в которые осуществляется через люки. За последние десять лет было зафиксировано несколько случаев вылета (самопроизвольного подъема на некоторую высоту) крышек люков в Москве и Московском регионе, которому, как выяснилось в результате исследования, предшествовали короткие замыкания и последующие выделения газов в сторону крышек люков. Как показали предварительные расчеты, энергия взрыва, выделявшаяся при коротком замыкании в данных случаях, достигала эквивалента 1,0 кг тротила.

Причина явления мощного взрыва заключается в чрезвычайно быстром превращении вещества в газообразные продукты, нагретые до высокой температуры, при этом мгновенно возникает высокое давление, порядка тысяч атмосфер, которое действует как толчок или удар на окружающие предметы. В работе описан механизм выделения газов при коротком замыкании, рассчитан ток металлического короткого замыкания в месте повреждения по [1], приведены возможные варианты решения проблемы.

В перспективе стоит задача проведения лабораторных и полевых опытов для более детального и глубокого понимания физических процессов, и исходя из этих опытов отыскание простого и экономичного, но обоснованного решения для внедрения на объектах для предотвращения вылета крышек люков кабельных колодцев.

Литература

1. **Крючков И.П., Старшинов В.А.** Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

И.О. Бутатов, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОБСТВЕННЫХ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЖИЛОГО СЕКТОРА

Ввиду постоянно растущего потребления электроэнергии электроприемниками крупных городов возникает необходимость в частичной разгрузке основной энергосистемы во избежание перебоев электроснабжения, а также создания резервов мощности на случай чрезвычайных ситуаций и аварий на уже существующих генерирующих объектах. Одним из возможных способов разгрузки энергосистемы электроснабжения потребителей жилого сектора является использование собственных биоэнергетических установок (БЭУ).

В качестве источника электроэнергии в данных установках используется биогаз.

Теоретический потенциал биогаза с содержанием метана 60 % составляет $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ [1]. По предварительным оценкам с помощью биогаза, полученного из продуктов нашей жизнедеятельности, в сутки возможно выработать до $2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии на человека, что составляет 30—50 % его среднестатистической потребности [2].

В настоящее время биоэнергетические установки широко применяются за рубежом [3], однако в России они практически не используются. Одной из причин этого является отсутствие методик расчета основных энергетических параметров БЭУ.

Для решения данной проблемы в рамках магистерской диссертации разрабатываются методики выбора БЭУ для двух случаев:

- 1) параллельной работы установки с энергосистемой;
- 2) автономной работы установки.

В будущем использование БЭУ позволит увеличить надежность электроснабжения потребителей и повысить энергоэффективность путем экономии на строительстве сетей электроснабжения.

Литература

1. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие. 1996.
2. Веденев А.Г., Маслов А.Н. Строительство биогазовых установок. Краткое руководство. Бишкек: «Евро», 2006.
3. Obrecht, Matevz; Denac, Matjaz Biogas — a sustainable energy source: new measures and possibilities for Slovenia. Journal of Energy Technology (2011): P.11—24.

Ш.Дж. Джураев, асп.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГУП «ТАЛКО»

Государственное унитарное предприятие «Таджикская алюминиевая компания» (ГУП «ТАЛКО») оказывает существенное влияние на режим работы энергосистемы Таджикистана, так как мощность, потребляемая заводом, достигает 47 % вырабатываемой всеми электростанциями республики. С учетом, что 95 % получаемой ГУП «ТАЛКО» электроэнергии идет на работу преобразовательных установок электролизных ванн, данное предприятие является доминирующим источником искажения синусоидальности кривой напряжения в электрических сетях республики на всех классах напряжения.

Для оценки фактического уровня помех, создаваемых предприятием, и разработки организационных, технических и методических мероприятий по обеспечению качества электроэнергии (КЭ) в период с 01 по 16 июля 2015 года был проведен инструментальный контроль КЭ в системе электроснабжения ГУП «ТАЛКО». В качестве средства измерения использовались приборы типа Ресурс-UF2М. Длительность наблюдения в каждой точке не менее суток. Результаты измерения показали, что КЭ не соответствуют нормативным требованиям [1] по следующим показателям:

- верхняя граница отклонения частоты Δf достигает +0,83 Гц, что связано с некорректной работой средств автоматического регулирования частоты в энергосистеме;

- зарегистрированы нарушения по $K_{U(n)}$ для следующих гармоник: $K_{U(11)}$ — до 3,15 %, $K_{U(13)}$ — до 2,3 %, $K_{U(23)}$ — до 1,7% и $K_{U(25)}$ — до 1,1 %. Спектр гармоник характерен для работы 12-пульсного преобразователя. При этом стоит отметить, что на момент проведения измерений завод работал только на 30 % своей мощности. В связи с этим можно ожидать, что при увеличении нагрузки предприятия уровень искажения синусоидальности кривой напряжения также возрастет.

Проведенные инструментальные исследования позволяют верифицировать математическую модель энергорайона, к которому подключен ГУП «ТАЛКО», и выбрать оптимальный способ подавления помех, создаваемых предприятием.

Литература

1. ГОСТ 32144—2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

ОПТИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ НАРЯЖЕНИЕМ 20 кВ ЖИЛОГО МИКРОРАЙОНА ГОРОДА

Мировые тенденции развития мегаполисов свидетельствуют о стремлении многих стран к использованию более высоких классов напряжения распределительных сетей. Основное направление для ввода нового напряжения 20 кВ в России осуществляется в двух городах — Москве и Екатеринбурге. План развития сетей в городе Москве приведен в [1]. Основные преимущества перехода очевидны — снижение потерь мощности, увеличение пропускной способности, улучшение показателей качества электроэнергии; недостатками же являются сложность поэтапного перехода, существенные затраты денежных средств, увеличение уровней токов КЗ и, как следствие, удорожание коммутационной и защитной аппаратуры и т.д.

Предпосылки к переходу были отмечены в 60-е годы прошлого века: в одной из республик СССР было обосновано применение сетей 20 кВ в крупных городах [2]. На данном этапе развития сетей не предполагалось стремительного роста нагрузки, а потому отсутствовала необходимость увеличения пропускной способности кабельных линий [3]. В то же время стоимость кабельной линии 20 кВ отличалась от кабельной линии 10 кВ в 2 раза [4].

Современные тенденции показывают неуклонный рост нагрузок в городах [3]. Возможно использование одного типа кабеля для напряжений 6, 10, 20 кВ. Однако для нового класса напряжения еще не выявлено конечное решение по выбору мощностей трансформаторов. В работе рассматривается обобщенная модель жилого района города с выделением трансформаторных подстанций и распределительных сетей низшего напряжения. Выбирается оптимальная мощность трансформаторов напряжением 20 кВ. Обоснование решений осуществляется с помощью технико-экономических сопоставлений различных вариантов.

Литература

1. **Схема** электроснабжения города Москвы на период до 2020 года. Приложение к постановлению Правительства Москвы от 14 декабря 2010 г. № 1067-ПП.
2. **Могильницкий Н.А., Шулов Б.С.** Применение напряжения 20 кВ в Латвийской ССР. М., 1963.
3. **Киселев А.Н.** Технико-экономический анализ городских распределительных электрических сетей с учетом их развития: дис... докт. техн. наук. М., 2002.
4. **Гордиевский И.Г., Лордкипанидзе В.Д.** Оптимизация параметров электрических сетей. М., 1978.

Н.А. Курилова, студ.; рук-ли А.В. Варганова, ст. преп.;
А.В. Малафеев, к.т.н., доц. (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

ОБ ОСНОВНЫХ СПОСОБАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «МГТУ» разрабатывается и внедряется программно-вычислительный комплекс (ПВК) «КАТРАН», в состав которого входит модуль «Оптимизация», позволяющий осуществлять оптимизацию режимов систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий (ПП) с собственными электростанциями по критерию минимума суммарных затрат на пар, с использованием метода динамического программирования [1]. Распределение экономически целесообразных нагрузок генераторов в ПВК реализуется с использованием трех подходов: без учета потерь мощности в распределительных сетях СЭС ПП (2, рис. 1); с учетом потерь мощности в СЭС (3, рис. 1); с учетом приема мощности из энергосистемы и ее передачи в СЭС ПП (4, рис. 1). Реализация данных алгоритмов и основные результаты изложены в [1].

ПВК позволяет определять суммарные затраты (З) на прием, передачу и генерацию мощности в СЭС ПП, являющиеся основным критерием оценки эффективности результатов. В ходе исследования СЭС ОАО «ММК» был осуществлен расчет оптимальных режимов и З с использованием указанных алгоритмов при работе электростанций по летнему и зимнему графикам (рис. 1), определены параметры существующего режима (1, рис. 1).

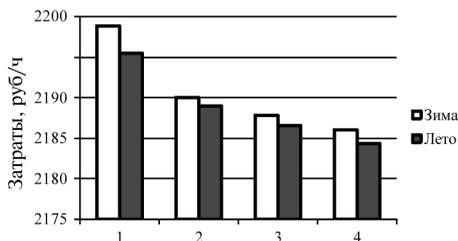


Рис. 1. Суммарные затраты на прием, передачу и генерацию электроэнергии в СЭС ПП

Результаты внедрения работы дают экономию денежных средств в размере 5 % в год, что составляет десятки миллионов рублей.

Литература

1. **Оптимизация режимов промышленных электростанций с учетом зависимых ограничений по условиям статической устойчивости и длительной несимметрии** / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, О.В. Газизова, Е.А. Панова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 119 с.

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ 10/0,4 кВ

Проблема компенсации реактивной мощности (КРМ) вызвана высокой нагрузкой элементов потоками реактивной мощности вследствие значительного ее потребления из сетей. Вопрос о коэффициенте реактивной мощности в распределительных сетях возникал уже давно [1]. Многочисленные исследования свидетельствуют о непрерывном росте коэффициента реактивной мощности потребителей. Низкий уровень КРМ обуславливает передачу по электрическим сетям большой доли реактивной мощности, которая вызывает перегрузку сетей. Поэтому сегодня наблюдается снижение пропускной способности распределительных сетей.

Существование работы, в которых рассматривалась идея применения КРМ для достижения нескольких целей, однако на практике при определении мест установки и мощности компенсирующих устройств по-прежнему применяется однокритериальная модель.

Первым этапом решения многокритериальной задачи является формирование частных критериев, причем система частных критериев должна быть полной, действенной, не избыточной, минимальной и разложимой [2].

Технические и технико-экономические показатели сетей и подключенных к ним потребителей в значительной мере определяются степенью КРМ. Поэтому в качестве показателей для решения задачи КРМ примем следующие:

- пропускная способность сети;
- потери напряжения;
- потери активной мощности;
- потери электроэнергии;
- капиталовложения при проектировании.

Последний критерий применим только на этапе проектирования, а первые пять применимы также на этапе эксплуатации электрической сети.

С помощью разработанной системы критериев станет возможным определение рационального уровня КРМ, учитывающего большее количество факторов.

Литература

1. **Кудрин Б.И.** История компенсации реактивной мощности: комментарий главного редактора // *Электрика*. 2001. № 6.
2. **Кини Р.Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА УРОВЕНЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Одним из основных показателей эффективности функционирования электрической сети является уровень потерь электроэнергии. В районных электрических сетях класса напряжения 110—220 кВ существенная доля технического расхода электроэнергии приходится на одну из составляющих условно-постоянных потерь, а именно на климатические потери, т.е. зависящие от погодных условий, которые, в свою очередь, подразделяются на потери на корону в ВЛ, от токов утечки по изоляторам ВЛ и на плавку гололеда [1].

В данной работе при помощи программного комплекса РАП-стандарт были проведены оценка и анализ влияния погодных условий на уровень технических потерь электроэнергии в районных электрических сетях. Исследовано влияние следующих метеорологических факторов: 1) количество дней со снегом, дождем и изморозью (за расчетный период); 2) среднегодовая температура; 3) изменение температуры в течение расчетного периода.

В результате исследования получено: 1) наибольшее воздействие оказывает увеличение дней с изморозью (увеличение потерь на корону более чем в 2 раза); 2) учет среднегодовой температуры привел к увеличению уровня потерь на 28 %. Результат влияния изменения температуры представлен на рис. 1. Анализ результатов позволил сформировать алгоритм, состоящий из комплекса мероприятий, способствующих снижению технического расхода электроэнергии.

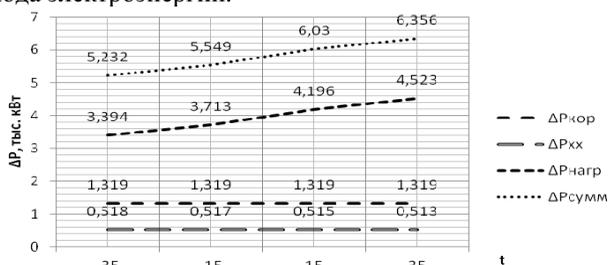


Рис. 1. Зависимость потерь мощности от температуры в течение года

Литература

1. Шведов Г.В., Сипачева О.В., Савченко О.В., Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

А.А. Пешков, студ.; рук. Д.Н. Удинцев, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЗА СЧЕТ УЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТИПА ИЗОЛЯЦИИ

Актуальность вопроса увеличения пропускной способности кабельной линии (КЛ) связана с постоянным увеличением электропотребления и появлением новых приемников электроэнергии, вследствие чего возникает необходимость развития или перестроения существующей системы электроснабжения. Обычно такое перевооружение не проводится, так как связано с высокими капитальными затратами. В результате этого КЛ работают на пределе пропускной способности, что приводит к возрастанию вероятности возникновения аварийных ситуаций, в результате превышения допустимой нагрузки и неудовлетворительного состояния изоляции.

Новизной в изучении вопроса увеличения пропускной способности КЛ является обоснование возможных актуальных потребителей, в интересах которых предполагается осуществить увеличение пропускной способности КЛ и разработки предложений по увеличению пропускной способности КЛ с помощью устройства защиты КЛ в зависимости от длительности аварийного режима и предварительной нагрузки.

На данном этапе работы выполнены: разработка устройства защиты КЛ в зависимости от длительности аварийного режима и предварительной нагрузки, учитывающего параметры КЛ (тип изоляции, допустимые нагрузки, срок службы, условия прокладки) [2]; разработка методики, позволяющей отслеживать тепловую нагрузку в режиме реального времени [1]. Проведен анализ применяемых защит КЛ.

В перспективе исследования данного вопроса — разработка макетного и промышленного образца устройства защиты КЛ как способ увеличения пропускной способности КЛ и улучшения показателей надежности электроснабжения, основанного на анализе сегодняшних реалий, запросов и возможностей энергосистемы.

Литература

1. **Мальшев А.В., Кривошеев Н.В., Маршнер Вольфгант К.** // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность 2008. № 2.
2. **Патент № 2503110/27.12.2013** Пайк Намвоок, Деокар Вишвас М.

Д.М. Серов, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИКАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Исследования в области качества электроэнергии (КЭ) показывают, что проблемы в этой области остаются актуальными на сегодняшний день. Значительная часть нарушений требований стандарта качества электроэнергии [1] связана с несинусоидальностью напряжения [2]. Основными источниками высших гармоник тока являются электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). При этом со стороны электросетевых компаний вклад в искажение формы кривой является незначительным. В соответствии с этим вопрос определения долевого участия каждого электроприемника в точке общего присоединения остается открытым.

Существующие подходы определения фактического вклада электроприемников основываются на контроле только в точке общего присоединения. А математическая база основывается на преобразовании Фурье. Она позволяет определить частотный спектр сигнала в каком-то временном интервале, но не отражает полную картину происходящих в системе процессов.

Современные информационные системы обеспечивают непрерывный контроль помех в точках присоединения электроприемников к сети. Их уникальные особенности определяются с помощью вейвлет-преобразования. Выбранная математическая база преобразует сигнал в двухмерную область, позволяя получить частотные компоненты и их расположение на временной оси. На основе этого строится алгоритм для определения фактического вклада мощных электроприемников с нелинейной ВАХ в точке общего присоединения к электрической сети. В работе составлена математическая модель, содержащая несколько источников помех со своими уникальными признаками и различным временем включения в сеть, позволившая оценить погрешность предложенного метода.

Литература

1. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. **Бучкина Е.А.** Динамика изменений показателей качества электроэнергии распределительных сетей ОАО «МОЭСК» // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. 380 с.

ВЫБОР ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО ВАРИАНТА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ 10/0,4 кВ

В условиях рыночной экономики потребителям электрической энергии представляется свобода выбора желательного для них уровня надежности электроснабжения, обеспечиваемого их платежеспособностью [1].

При использовании схем с однострансформаторными подстанциями (ТП) и резервирующими межтрансформаторными переключателями кабелями низкого напряжения время ввода резерва $T_{п1}$ определяется действиями персонала. При использовании схем с двухтрансформаторными ТП при установке секционного аппарата без АВР время ввода резерва $T_{п2}$ определяется действиями персонала. При установке на двухтрансформаторной ТП секционного выключателя с АВР время ввода резерва $T_{п3}$. Очевидно, $T_{п1} > T_{п2} > T_{п3}$, что при прочих равных условиях соответствует уровню надежности. При выполнении технико-экономического обоснования проекта системы электроснабжения объекта 10/0,4 кВ с разными вариантами резервирования сравниваются суммарные дисконтированные затраты на распределительные трансформаторы, линии электропередачи, электрические аппараты, компенсирующие устройства среднего и низкого напряжения, а также затраты на резервирование [2]. В

табл. 1 представлены значения разницы дисконтированных затрат ΔZ_i (в процентах минимального Z_{\min}): от номинальной мощности трансформаторов $S_{н.т}$ для трех вариантов системы электроснабжения промпредприятия с расчетной мощностью 6700 кВт и площадью 13 тыс. м²: В1 — однострансформаторные ТП с резервированием кабельными линиями низкого напряжения; двухтрансформаторные ТП с установкой секционного аппарата на шинах низкого напряжения; В2 — без АВР и В3 — с АВР.

Таблица 1
Зависимость разницы затрат от номинальной мощности ТР

$S_{н.т}$, кВА	1	2	3
250	36	57	61
400	14	32	36
630	3	20	25
1000	0	18	22
1600	3	22	27
2500	10	32	37

Литература

1. Красник В.В. Управление электрохозяйством предприятий: Произв.-практ. пособие. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
2. Конюхова Е.А. Электроснабжение: учебник для студ. учреждений выс. проф. образования. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В данное время в России акцентировано внимание на энергоэффективности и энергосбережении, при этом одной из технических задач является уменьшение перетоков реактивной мощности [1]. Одна из проблем — низкая эффективность действующих средств и алгоритмов управления режимами работы группы синхронных двигателей, используемых для компенсации реактивной мощности.

Регулирование тока возбуждения и, как следствие, реактивной мощности обычно проводится для каждого двигателя в отдельности. Принцип же группового регулирования позволяет сделать системы электроснабжения более «гибкими», делая сети активно-адаптивными.

В процессе исследования были проанализированы режимы работы узлов нагрузки, к которым подключены синхронные двигатели, была составлена математическая модель узла нагрузки для определения уровня компенсации реактивной мощности двигателями, при котором будут минимальные потери в питающей сети и оптимальная величина напряжения.

Используя математическую модель [2], была написана компьютерная программа, определяющая величину реактивной мощности, генерируемой группой синхронных двигателей для поддержания оптимального уровня напряжения узла. В ходе исследования показано, что применение группового регулирования реактивной мощности синхронных двигателей эффективно при централизованной компенсации и неравномерном суточном графике нагрузки.

Результаты исследований могут быть использованы при регулировании тока возбуждения синхронных двигателей узла нагрузки посредством групповых регуляторов реактивной мощности.

Литература

1. **Кабышев А.В.** Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.
2. **Охотников М.Н.**, Комплексная система управления возбуждением группы синхронных двигателей: дис.... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 1994. 209 с.

А.С. Щепотин, студ.; рук. Д.В. Саленик, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАРМОНИЧЕСКОГО МЕТОДА

Потребители электроэнергии с нелинейными режимами потребления вызывают искажение формы напряжения в сети. В ГОСТ 32144—2013 нормируется уровень гармонических составляющих и коэффициента несинусоидальности. Для оценки несинусоидальности напряжения существуют различные методы расчетов, такие как классический во временной области, операторный, интегральный, гармонический. Последний из перечисленных может быть применен для инженерных расчетов разветвленных сетей. Интеграция с методами, в которых используются обобщенные параметры сети, позволяет проводить оценку искажения формы напряжения для сетей любой сложности.

В настоящей работе с помощью гармонического метода была проведена оценка несинусоидальности напряжения в районной электрической сети, содержащей нелинейную нагрузку — тяговую подстанцию. В рамках работы у гармонического метода были выявлены следующие достоинства: простота; отсутствие необходимости решения сложных математических уравнений; возможность использования при вероятностной постановке задачи [1]. Также оценка несинусоидальности была проведена с помощью моделирования в имитационной среде MatLab Simulink. Здесь модель описывается системой дифференциальных уравнений, результаты получаются наиболее точными.

Результаты расчета двумя способами имеют расхождения. Возможная причина — наличие в гармоническом методе эмпирически полученных формул, определяющих амплитуды гармоник источников ЭДС, представляющих в расчетах нелинейные нагрузки.

Таким образом, было установлено, что гармонический метод является перспективным для оценки искажения формы напряжения в сетях любой сложности, однако требует дальнейшего развития и корректировки моделей нелинейных нагрузок.

Литература

1. **Фокин Ю.А., Ильинская Л.И.** Руководство по решению задач по курсу «Электроснабжение». М.: Издательство МЭИ, 1998.

А.Ю. Якунин, студ.; рук. Г.В. Шведов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ НАИВЫГОДНЕЙШЕЙ МОЩНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 20 кВ

Стратегия развития распределительных сетей в г. Москве на среднесрочную перспективу [1] предусматривает перевод сетей 6 кВ на напряжение 10 и 20 кВ, а также применение напряжения 20 кВ в районах новой высокоплотной застройки.

Установлено, что применение напряжения 20 кВ позволит потенциально в 4 раза сократить потери электроэнергии в электрических сетях районов новой высокоплотной застройки.

Для этих вновь строящихся районов плотность нагрузки крайне высока, к тому же в большинстве случаев источник питания находится на значительном расстоянии от района и не имеет достаточного количества свободных ячеек для подключения питающих фидеров. Все это в совокупности обосновывает использование промежуточного звена в цепи электропитания потребителей — распределительных (РП) или соединительных пунктов (СП).

Однако способы определения наивыгоднейшей их пропускной способности (мощности) для такого класса напряжения попросту отсутствуют. Все существующие методики определения этого параметра разработаны в 50-е и 80-е годы прошлого века ([2, 3] и др.) и устанавливают его значение для совокупности оборудования, рассчитанного на классы напряжения 6 и 10 кВ.

Автором предлагается адаптация данных методик к экономическим и техническим параметрам нашего времени — математическая модель, позволяющая описать зависимости наивыгоднейшей мощности РП и СП 20 кВ от поверхностной плотности нагрузки. Учет различия экономических параметров РП и СП, опыта и причин применения СП в пилотных проектах электроснабжения районов на напряжении 20 кВ позволит, в конечном итоге, установить условия экономической оправданности их применения.

Литература

1. **Схема** электроснабжения города Москвы на период до 2020 года. Приложение к постановлению Правительства Москвы от 14 декабря 2010 г. № 1067-ПП.
2. **Никогосов С.Н.** Принципы рационального построения городских кабельных сетей среднего (6—10 кВ) напряжения: дис....канд.техн. наук. Л., 1952.
3. **Глазунов А.А.** Системный метод оптимизации структур и параметров электроснабжения городов: дис.... докт. техн. наук. М., 1981.

Секция 52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Председатель секции — зав. каф. электрических станций,
к.т.н., профессор Ю.П. Гусев
Секретарь секции — к.т.н., ассистент А.А. Антонов

*К.С. Аверьянова, студ.; рук-ли Н.В. Безменова, к.т.н., доц.;
В.П. Степанов, д.т.н., проф. (СамГТУ, г. Самара)*

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ПОДСТАНЦИЯХ

Исследования [1] показали, что несоблюдение условий электромагнитной совместимости (ЭМС) по магнитным полям промышленной частоты в комплектных распределительных устройствах (КРУ) является серьезной причиной нарушений (до 9 %) в работе вторичных технических устройств распределительных подстанций.

С целью определения электромагнитной обстановки в КРУ 6 (10) кВ на подстанциях г. Самара были проведены измерения напряженностей магнитных полей промышленной частоты с помощью прибора ПЗ — 50.

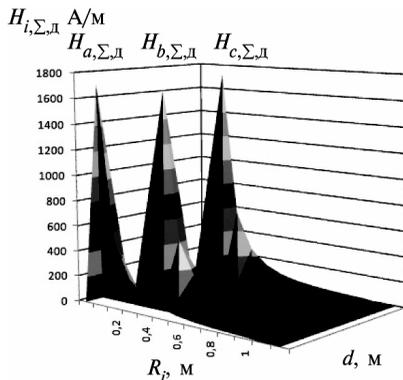


Рис. 1. Графическая модель изменения суммарной напряженности $H_{i, \Sigma, \Delta}$ от симметричных трехфазных токов

В ячейках КРУ с напряжением 6—10 кВ шины с рабочими токами, как правило, расположены вертикально, расстояния между центрами шин составляет примерно 0,2 м, а расстояние между шинами и горизонтальной плоскостью расположения корпусов микропроцессорной релейной защиты (МПРЗ) составляет 0,4—0,6 м.

Графическая модель изменения напряженности от трехфазной системы шин с симметричными токами приведена на рис. 1.

При этом из рис. 1 следует, что наибольшие значения напряженности магнитного поля промышленной частоты (МППЧ) наблюдаются напротив крайних фаз *a* и *c*, а наименьшие напротив фазы *b*, где является целесообразным установка устройства МПРЗ.

Литература

1. **Фещенко В.А.** Решение проблемы ЭМС в ОАО «ФСК ЕЭС» // Энергоэксперт. 2008. № 5(10). С. 68—71.

А.Н. Азаров, асп.; рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГРУППОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В электроустановках наружного освещения г. Москвы и других городах находят свое применение регуляторы-стабилизаторы напряжения, применяемые для снижения напряжения. Использование регулятора позволяет экономить электроэнергию, увеличивает срок службы ламп, снижает эксплуатационные расходы [1]. В зависимости от величины понижения напряжения, а также от продолжительности диммирования экономия электроэнергии составляет от 11 до 32 % [2]. Мощные стабилизаторы переменного напряжения, как правило, содержат вольтодобавочные трансформаторы [3] (бустеры).

Основным недостатком применяемых регуляторов-стабилизаторов является их высокая стоимость, вызванная избыточной точностью регулирования и применением сложных схем управления на электронной основе. В связи с этим существует потребность в более экономичном регуляторе напряжения.

Автором было осуществлено сравнение схем управления переключением ступеней регулирования бустера на электронной, релейной и электро-механических основах. На основе сравнения разработаны схема управления регулятором, содержащая микропроцессорный контроллер, и переключатели ступеней регулирования. Разработан общий подход к организации дистанционного и автоматического управления регуляторами напряжения, а также рассмотрены вопросы построения SCADA системы, обеспечивающей контроль токов и напряжений, состояния коммутационных аппаратов и управление включением/отключением освещения и переключением ступеней регулирования.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке регуляторов-стабилизаторов напряжения, создании автоматизированных систем управления наружным освещением, внедрении энергосберегающих технологий.

Литература

1. **Сибриков А.В., Киричок А.И.** Способы энергосбережения в наружном освещении Москвы // Энергоаудит, энергосервис, энергосбережение. 2011. Спец.
2. **Белушко П.Б., Сибриков А.В.** Эффективные способы освещения // Мир дорог. 2011. Декабрь.
3. **Файда Е.Л., Сивкова А.П.** Трансформаторные стабилизаторы переменного напряжения с регулированием на первичной стороне// Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 3.

В.В. Горошилов, студ.; рук. М.С. Волков, к.т.н., асс. (НИУ «МЭИ»)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ УРОВНЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Актуальность работы обусловлена постоянным ростом цен на электроэнергию, необходимостью уменьшения потерь электроэнергии в процессе ее передачи потребителям. Существующие подходы к оптимизации распределительных сетей не обеспечивают достижения максимальной энергоэффективности [1—3]. Требуется разработка новых способов и комплексных подходов к проблеме снижения потерь электроэнергии.

В настоящей работе были проведены комплексные исследования по выявлению факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на потери электроэнергии в распределительных сетях, выявлено оборудование, в котором возникают максимальные потери, определены пути снижения потерь электроэнергии.

Целью работы является разработка алгоритма оптимизации работы распределительных сетей, обеспечивающего выбор комплекса технико-экономически обоснованных мероприятий по минимизации электрических потерь в распределительных сетях. В основе алгоритма заложены следующие подходы: оптимизация точек деления в распределительных сетях, оптимизация мест установки, количества и мощности компенсирующих устройств с учетом технико-экономических показателей. Рациональное сочетание различных мероприятий по снижению электрических потерь позволит существенно повысить энергоэффективность.

Разработанный алгоритм планируется реализовать в виде макромодели на языке Visual Basic Script в программном комплексе RastWin для использования в качестве инструмента автоматизации решаемой задачи.

Литература

1. **Воротницкий В.Э, Казанцев В.Н.** Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / под ред. В.Н. Казанцева. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Инструкция** по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений. М.: СПО «Союзтехэнерго», 1987.
3. **Железко Ю.С.** Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

В.Г. Жирнов, студ.; рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

КООРДИНАЦИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Проблема координации токов короткого замыкания (КЗ) является чрезвычайно важной в любой электроэнергетической системе (ЭЭС), так как уровень КЗ определяет требования при выборе оборудования, а следовательно, определяет экономичность и надежность ЭЭС. Координация токов КЗ осуществляется как путем применения различных токоограничивающих устройств (ТОУ) в фазах электрических сетей — продольное токоограничение, так и изменением связи нейтральной точки электрической сети с заземляющим устройством (режима нейтрали электрической сети) — поперечное токоограничение [1].

В настоящей работе рассматриваются возможности применения устройств, способных быстро изменять свое сопротивление, — сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) в процессах продольного и поперечного токоограничения в ЭЭС [2].

Целью работы является анализ принципов работы и способности к токоограничению СОТ различных исполнений [3], анализ схемных решений применения сверхпроводниковых токоограничителей, анализ последствий применения СОТ в различных областях ЭЭС с технической точки зрения.

Для достижения основной цели анализа поставлены и решены следующие задачи: разработка математической модели электромагнитного переходного процесса при наличии в сети СОТ; выявление мест и областей целесообразного применения СОТ в фазах и нейтральных ЭЭС для реализации продольного и поперечного токоограничения соответственно; формирование требований к параметрам СОТ с учетом различных факторов.

Литература

1. **Черноплеков Н. А.** Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестн. Российской акад. наук. 2001. Т. 71. № 4. С. 303—319.
2. **Сверхпроводниковые** токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем / И.З. Глушкин, Г.А. Дмитриева, М.Ш. Мисриханов и др. М.: Энергоатомиздат, 2002.
3. **Елагин П.В.** Сверхпроводниковый токоограничитель. Коммутационный аппарат будущего // Новости электротехники [Электронный ресурс]. 2005. № 3 (33). С. 1—9.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Главной целью данной работы является проведение сравнительного анализа интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) автоматизированных систем управления электрооборудованием электростанций и подстанций различных производителей. Стандарт МЭК 61850 позволяет осуществлять взаимосвязь различных устройств посредством цифрового обмена [1]. Стандартизация структуры хранения и наименования делает возможным совместимость при обмене данными между устройствами различных фирм-производителей при помощи программного обеспечения независимых разработчиков.

МЭК 61850 не описывает требования по конструкции и программированию ИЭУ, составу и распределению логических узлов между устройствами и определяет не логическое описание функции, а модель данных функции, то есть требования к описанию информации внутри устройства [2]. В ходе исследования на примере шкафа управления и защит линии 110 кВ были рассмотрены основные функции, принципы работы интеллектуальных устройств, проведен анализ конструкции устройств фирм: *Siemens* и *ABB*. Для сравнения были выбраны интеллектуальные устройства *ABB* серии *RELION RET 670* и *SIEMENS SIPROTEC 7SA610*. В работе рассмотрены функциональные возможности ИЭУ, виды модулей устройств связи с объектом (*AI, DI, DO*), проанализированы средства программирования контроллеров (*FBD, CFC*), проведено подробное описание конфигураций программного обеспечения *PCM 600* и *DIGSI 4*.

Сравнительный анализ, проведенный в данной работе, позволяет перейти к следующему этапу исследования: рассмотрению возможности взаимозаменяемой совместной работы двух устройств различных фирм и их связь посредством *GOOSE*-сообщений в соответствии со стандартом МЭК 61850.

Литература

1. Трофимов А.В., Поляков А.М. Основы организации микропроцессорных автоматизированных систем управления технологическими процессами электроустановок. М.: Издательство МЭИ, 2014.
2. IEC 61850. Communication networks and systems in substations. Technical committee 57. International Electrotechnical Commission, 2003.

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

ВЛИЯНИЕ МОБИЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ В МЕСТАХ ИХ ПОДКЛЮЧЕНИЯ

Мобильные газотурбинные электрические станции (МГТЭС) в последние годы находят широкое применение в электроэнергетике с целью поддержания надежности энергосистем в часы пиковых нагрузок с возможностью оперативного перемещения МГТЭС в энергодефицитные районы различных регионов России.

Например, ОАО «Мобильные ГТЭС» эксплуатирует 16 мобильных газотурбинных электростанций совокупной мощностью 360 МВт на классах напряжений 0,4–220 кВ.

Выбор места подключения МГТЭС и надежность электропитания в значительной степени зависят от схемы узла подключения МГТЭС, параметров установленного оборудования и правильного расчета токов короткого замыкания (ТКЗ) в электроустановках 0,4—220 кВ, а также использование различных способов координации ТКЗ [1].

Показано, что при подключении МГТЭС возникает необходимость применения мероприятий по ограничению ТКЗ, а именно: схемные решения (оптимизация структуры сети и ее параметров); переход на новую ступень напряжения; стационарное и автоматическое (аварийное) секционирование сети; применение токоограничивающих реакторов и токоограничивающих устройств (ТОУ) [2].

В работе представлены результаты анализа изменения уровня ТКЗ при использовании МГТЭС, показана зависимость ТКЗ от мощности генераторов МГТЭС и напряжения выдачи мощности. Выявлены проблемы и последствия неучета некоторых параметров при коротких замыканиях. На основе полученных данных представлены рекомендации по повышению надежности сетей с использованием мобильных газотурбинных электрических станций.

Литература

1. **Жуков В.В.** Электрическая часть электростанций с газотурбинными и парогазовыми установками: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
2. **Александров А.С., Жуков В.В.** Ограничение токов коротких замыканий в сетях высокого напряжения развивающихся энергосистем // Вестник МЭИ. 2012. № 2.

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

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ВВЕДЕНИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПГУ

Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики Российской Федерации на период до 2020 года намечен ввод в эксплуатацию современных парогазовых установок (ПГУ) [1]. В связи с этим возникает проблема увеличения уровней токов короткого замыкания и встаёт вопрос о замене большого количества единиц коммутационного оборудования.

Проведенные расчеты токов короткого замыкания на перспективу до 2020 года показали, что в электрической сети Мосэнерго токи короткого замыкания на шинах 110 — 220 кВ распределительных устройств крупных электростанций увеличатся до 120-140 кА, в то время как отключающая способность выпускаемых промышленностью выключателей не превышает 63 кА [2]. В соответствии с этим актуальной является проблема анализа изменения уровней токов короткого замыкания и разработка рекомендаций по их ограничению.

В работе выполнен анализ изменения уровней токов короткого замыкания на отдельных электростанциях и в энергосистеме московского региона. Для оценки роста токов короткого замыкания рассмотрен ряд электрических станций с установленными энергоблоками ПГУ и электростанций, на которых предполагается их установить в соответствии со стратегией развития электроэнергетики до 2020 года.

Показано, что ограничение роста уровня токов короткого замыкания для вновь строящихся энергообъектов с энергоблоками ПГУ может быть достигнуто оптимизацией структуры и параметров электрических сетей и генерирующих мощностей электрических станций.

Составлена статистика изменения уровней токов короткого замыкания в зависимости от мощности энергоблоков ПГУ.

Разработаны рекомендации по ограничению токов короткого замыкания и обеспечению надежности работы оборудования в электроэнергетической системе при введении энергоблоков ПГУ.

Литература

1. **Основные** положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. Проект ОАО РАО «ЕЭС России».
2. **Антипов К.Н., Востросаблин А.А., Жуков В.В.** О проблеме координации уровней токов КЗ в энергосистемах // Электрические станции. 2004. №4.

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРОВ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

В системах оперативного постоянного тока (СОПТ) могут возникать импульсные всплески напряжения. Наиболее распространенными причинами их возникновения являются отключения электромагнитных приводов масляных выключателей и коротких замыканий. В связи с использованием на современных электростанциях и подстанциях микропроцессорных релейных защит, имеющих повышенную чувствительность к перенапряжениям, актуальна задача исследования и ограничения таких перенапряжений.

Цель работы — оценка влияния фильтров зарядных устройств (ЗУ) на межполюсные перенапряжения при отключении короткого замыкания. Авторами была разработана математическая модель СОПТ в программном комплексе *EMTP-RV* (рис.1). Сопоставлены перенапряжения при использовании ЗУ без фильтра с ЗУ, укомплектованными *L*- и *L-C*-фильтрами.

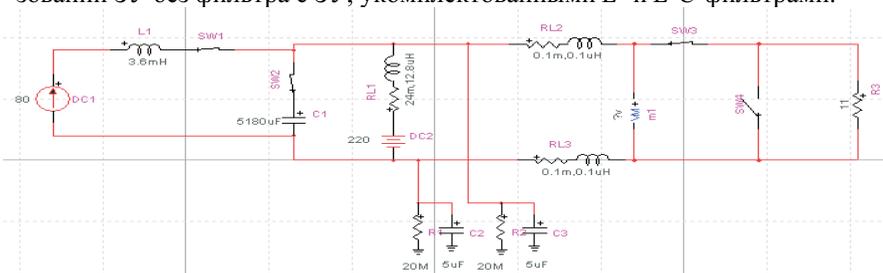


Рис.1. Модель СОПТ в программном комплексе *EMTP-RV*

Установлено, что в СОПТ с ЗУ без фильтра и с *L*-фильтром перенапряжения достигают 4740 В, что превышает допустимые [1]. Применение ЗУ с *L-C*-фильтром, имеющим емкость 5180 мкФ, позволило снизить перенапряжения до 550 В.

Вывод: *L-C*-фильтры ЗУ являются эффективным средством ограничения перенапряжений в СОПТ, что позволяет не устанавливать дополнительные устройства для защиты от перенапряжений.

Литература

1. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5:2001) Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.

*Н.А. Панасецкий, Д.А. Наставшев, студенты (НИУ «МЭИ»);
рук. Д.В. Сорокин, к.т.н. (НТЦ ФСК ЕЭС)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Реализация требований нового стандарта серии МЭК 61850 в отличие от старой версии регламентирует точность измерений не только в установленных, но и в переходных режимах энергосистем [1]. Стандартизация этой функциональности дает мощный импульс внедрению систем управления и противоаварийной автоматики, основанных на измерениях, получаемых от устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ). Вследствие точной временной синхронизации системы УСВИ предоставляют информацию значительно более высокого качества по сравнению с существующими системами телеизмерений.

Внедрение систем УСВИ сделало возможным определение параметров схемы замещения элементов сети в режиме реального времени прямыми расчетами [2]. Однако при оценке параметров схемы замещения энергосистемы, состоящей из отдельных элементов (ЛЭП, силовых трансформаторов, генерирующего оборудования и прочих), была зафиксирована погрешность полученных значений для смоделированного элемента электроэнергетической системы на основании данных от УСВИ при переходных режимах сети, а также при сбое в работе одного из устройств УСВИ, располагаемых по концам элемента электрической сети (воздушной линии электропередачи).

В данной работе проведен анализ актуальных проблем в определении параметров схемы замещения, а также предложена методика расчета на основе информации, поступающей от устройств синхронизированных векторных измерений. Для апробации данной методики осуществлено математическое моделирование элемента электроэнергетической сети с последующим тестированием на полигоне Центра системных исследований и разработок интеллектуальных энергосистем ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Литература

1. **IEC 61850:2003.** Communication networks and systems in substations. Technical committee 57. International Electrotechnical Commission, 2003.
2. **Бердин А.С., Коваленко П.Ю., Плесняев Е.А.** Влияние погрешности измерений РМУ при определении параметров схемы замещения ЛЭП // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2012. № 66 (1).

Д.Н. Санжаров, асп.; рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДСТАНЦИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

Опыт эксплуатации систем оперативного постоянного тока (СОПТ) на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС) свидетельствует о периодически возникающих случаях ложной работы микропроцессорных релейных защит из-за помех, возникающих в их цепях питания. Ранее, когда релейная защита (РЗ) выполнялась на базе электромеханических реле, помехи не вызывали существенных проблем. С внедрением микропроцессорной техники, более чувствительной к помехам, возникла опасность ложных срабатываний релейной защиты и автоматизированных систем управления ЭС и ПС. Это, в свою очередь, может вызывать серьезные аварии на энергообъектах страны. Поэтому становится актуальной задача пересмотра требований к качеству электропитания и разработки научно обоснованных рекомендаций по выбору способов заземления сетей СОПТ как одного из способов снижения уровня [1].

Исследование помехоустойчивых вариантов заземления СОПТ подстанций проведено с помощью математических моделей этих систем в программном комплексе *EMTP-RV*. Параметризация моделей проведена с учетом статистического анализа имеющихся данных. Также создана метаматематическая модель в программном комплексе *MathCAD 15*, позволяющая оценить электромагнитную связь между цепями СОПТ и первичными цепями.

На основе вычислительных экспериментов проанализированы условия возникновения помех в цепях оперативного постоянного тока подстанций при различных вариантах их заземления с помощью математических моделей СОПТ подстанций и их элементов.

Результаты исследований могут быть применены для оптимизации существующих систем оперативного постоянного тока подстанций, а также для снижения аварийности и уменьшения числа ложных срабатываний релейных защит. Математическая модель СОПТ может быть расширена до модели реально существующей СОПТ электростанции или подстанции [2].

Литература

1. Гусев Ю.П., Тимонин И.А. Защита микропроцессорных устройств релейной защиты от перенапряжений в системах оперативного постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 1. С. 84—85.
2. Гусев Ю.П., Монаков Ю.В., Чо Г.Ч. Предотвращение срабатываний дискретных входов микропроцессорных релейных защит при замыканиях на землю в системах оперативного постоянного тока // Энергоэксперт. 2011. № 5. С. 70—77.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАХ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

Профили нагрузки систем оперативного постоянного тока (СОПТ) электростанций и подстанций характеризуются неравномерностью, обусловленной наличием электроприемников, подключаемых в процессе разряда аккумуляторной батареи (АБ). Это усложняет задачу расчета напряжения для проверки выполнения нормативных требований по провалам и отклонениям напряжения на клеммах электроприемников СОПТ [1]. В работе проведено моделирование разряда АБ для расчета напряжения на электроприемниках СОПТ. Практическое применение моделей разряда АБ возможно на этапе проектирования, при проверке правильности выбора АБ, в процессе реконструкции для проверки допустимости изменения состава первичного и вторичного электрооборудования на объекте и при оценке остаточного ресурса АБ.

Для моделирования разряда АБ выбран метод Шеферда—Дасояна [2]. В методе учитываются активационная поляризация, концентрационная поляризация и падение напряжения на активном сопротивлении аккумулятора. Проведено сопоставление составляющих метода электрохимическим процессам, происходящим в аккумуляторе в процессе его разряда. Так, резкое изменение напряжения в начале разрядной характеристики обусловлено активационной поляризацией; дальнейшее плавное снижение напряжения, заканчивающееся быстрым падением, обусловлено концентрационной поляризацией. Параметризация модели проводилась по разрядным характеристикам аккумуляторов. Верификация модели выполнена путем сопоставления расчетного напряжения с напряжением в соответствии с паспортными разрядными характеристиками.

Следует продолжить работу с моделью для реализации функции расчета напряжения при многоступенчатом профиле нагрузки СОПТ.

Литература

1. **СТО 56947007-29.120.40.041-2010.** Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования.
2. **Галушкин Д.Н., Галушкин Н.Е.** Разряд щелочных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2007. Т.7. № 2. С. 99—102.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С УЧЕТОМ ПОДКЛЮЧЕННОЙ НАГРУЗКИ

Одним из важных направлений в теории измерительных трансформаторов является учет динамических процессов, которые возникают при изменении параметров как сети, так и присоединенной нагрузки. Заранее выполненный расчет аварийного переходного процесса необходим для наладки автоматической защиты. Анализ этих процессов затруднен нелинейностью магнитной цепи и учетом нагрузки, которая в общем случае содержит реактивные элементы. В настоящее время при анализе нелинейных динамических схем широко применяется метод переменных состояния, который совместим со многими методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений и может считаться универсальным методом. На основании этого метода была создана математическая модель динамических процессов в измерительных трансформаторах, которая позволяет анализировать как статические, так и динамические процессы в измерительных трансформаторах самых различных конструкций при любых нагрузках.

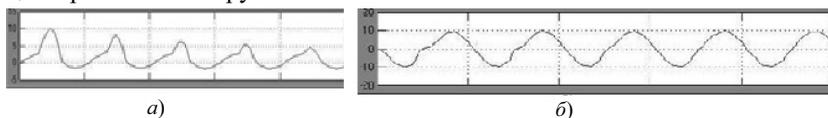


Рис. 1. Кривые переходного процесса в измерительном трансформаторе при подключении нагрузки:

a — первичный ток; *b* — вторичный ток

При подключении к выводам вторичной обмотки измерительного трансформатора нагрузки, представленной резистивными и реактивными элементами, получаем следующие кривые первичного и вторичного токов (рис. 1, *a* и *b* соответственно). Анализ кривых показывает разницу в длительности переходных процессов при подключении нагрузки.

Литература

1. **Мартынов В.А.** Современные модели и методы расчета нелинейных электромагнитных устройств. Иваново, 2000. 140 с.
2. **Снитько И.С.** Применение математической модели динамических электромагнитных процессов в измерительных трансформаторах // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ-2012». Т. 3. С. 179—184.
3. **Рожкова Л.Д., Козулин В.С.** Электрооборудование станций и подстанций: учебник для техникумов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 648 с.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С КАБЕЛЕМ ПОДВОДНОЙ ПРОКЛАДКИ

В электрических сетях нашей страны используют силовые кабели 110 — 220 кВ подводной прокладки, в частности при электроснабжении о. Русский (г. Владивосток), при сооружении энергомоста с полуостровом Крым. Кабели подводной прокладки, как правило, имеют трехфазную конструкцию — три экранированные жилы и общий экран под оболочкой кабеля (рис. 1). Такой кабель представляет собой систему из семи проводников с взаимной индукцией, определение сопротивлений прямой и нулевой последовательности подводного кабеля является трудоемкой задачей [1].

В ходе исследования были решены несколько задач. Во-первых, была составлена и решена аналитическая система уравнений падения напряжения в жилах и экранах [2] для вариантов одностороннего и двухстороннего заземления жильных экранов, учитывающая взаимную индукцию проводников в кабеле. В результате получены выражения для расчета сопротивлений прямой и нулевой последовательности подводного кабеля из собственных и взаимных сопротивлений жил и экранов. Во-вторых, на основе геометрического расположения и удельного сопротивления жил и экранов рассчитаны собственные и взаимные сопротивления жил и экранов в математической модели подводного кабеля в программе *EMTP (RV)*.

В-третьих, получены соотношения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности к сопротивлениям прямой последовательности R_0 / R_1 и X_0 / X_1 подводного кабеля, которые могут быть использоваться при выполнении приближенных расчетов кабельных линий аналогичной конструкции, например, при отсутствии паспортных параметров.

Полученные результаты могут быть востребованы в подразделениях релейной защиты электросетевых компаний, а также при обновлении содержания учебной дисциплины «Расчет токов короткого замыкания».

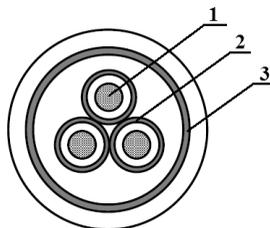


Рис. 1. Конструкция кабеля подводной прокладки с пофазно-экранированными жилами и общим экраном:

1 — жилы; 2 — жильные экраны (медь); 3 — общий экран (медь)

Литература

1. Антонов А.А., Гусев Ю.П. Влияние способов заземления экранов и взаимной индукции пофазно-экранированных кабелей 6—35 кВ на токи двойных однофазных замыканий на землю // Энергетик. 2013. № 9. С. 42—44.

2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6—500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА ТЕПЛООВОГО СПАДА ТОКА ПРИ УДАЛЕННЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В распределительных сетях (РС) среднего напряжения все более широкое применение находят микропроцессорные терминалы защит, в которые заложены инверсные времятоковые характеристики (ВТХ) срабатывания, соответствующие стандартам МЭК 60255-3 и IEEE StdC37.112. Для данных характеристик снижение кратности тока короткого замыкания (КЗ) относительно уставки защиты может приводить к значительному увеличению выдержки времени срабатывания и соответственно увеличению влияния теплового спада на величину тока КЗ к моменту срабатывания защиты. При этом в существующих нормативных документах по расчету КЗ (ГОСТ Р 52735-2007, РД 153-34.0-20.527-98) отсутствуют жесткие требования по учету теплового спада тока КЗ.

Для оценки необходимости учета теплового спада была разработана математическая модель участка РС, в основе которой был заложен алгоритм аналитического решения дифференциального уравнения теплового баланса с учетом неадиабатического нагрева проводников.

В результате моделирования были получены кривые изменения действующего значения тока короткого замыкания в зависимости от времени отключения КЗ при различной удаленности точки КЗ, которые были проанализированы совместно с инверсными ВТХ срабатывания защит с позиции величины тока, продолжительности отключения КЗ и температуры нагрева кабелей. Установлено, что:

- при использовании инверсных ВТХ при кратности тока КЗ 1,2, что соответствует минимальному коэффициенту чувствительности для резервной зоны защиты, тепловой спад может оказывать существенное влияние на значение тока и продолжительность отключения КЗ;

- при кратности тока КЗ больше 1,5, что соответствует минимальному коэффициенту чувствительности для основной зоны защиты, тепловой спад следует учитывать только при использовании чрезвычайно инверсной ВТХ;

- если условия термической стойкости выполняются при КЗ на головном участке линии, то они будут выполняться и при удаленных КЗ при использовании любых стандартных инверсных ВТХ.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методических указаний по выбору характеристик срабатывания микропроцессорных защит, а также при оценке допустимости существования нормальных и ремонтных коммутационных состояний схем распределительных сетей.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА СРЕДНЕМ НАПРЯЖЕНИИ

Растущий по всему миру спрос на энергоносители требует более мощных или дополнительных трансформаторов, генераторов и более тесную взаимосвязь сетей электроснабжения. Это может приводить к тому, что фактические токи короткого замыкания электрооборудования превышают максимально допустимый уровень и элементы электроустановок разрушаются под действием электродинамических сил и чрезмерного нагрева.

Однако от замены имеющихся коммутационных аппаратов, кабелей и другого электрооборудования на новое с более высокой стойкостью к коротким замыканиям часто отказываются из соображений экономии.

Одним из способов решения проблемы является использование сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов с пиротехническим (взрывным) приводом на номинальные напряжения до 35 кВ. Время срабатывания этих ограничителей менее 1/4 периода частоты 50 Гц [1].

Эти коммутационные аппараты могут использоваться в следующих случаях:

- в цепи секционного выключателя;
- при вводе дополнительных генерирующих мощностей;
- для шунтирования токоограничивающих реакторов.

В работе проведен сравнительный анализ сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов зарубежных фирм и российских производителей.

В качестве примера было рассмотрено электроснабжение Светлогорского целлюлозно-бумажного комбината. Дополнительный ток подпитки короткого замыкания от вновь установленного генератора вызывал превышение уровня допустимого тока короткого замыкания в сети электроснабжения предприятия.

Решением явилось подключение нового генератора через два ограничителя тока короткого замыкания типа *Is-limiter*. В работе были определены критерии срабатывания и выбраны уставки срабатывания сверхбыстродействующих аппаратов для токов, протекающих через ограничители.

Литература

1. E. Dreiman, V. Grafe, K.-H. Hartug. Schutzeinrichtung zur Begrenzung von Kurzschlussströmen. etzbd 115 (1994, Heft 9, s.492-494).

Д.В. Шкловский, студ.; рук. А.В. Трофимов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ОБМЕНА МЕЖДУ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ В АСУ ЭТО

Целью данной работы является разработка методических материалов по теме информационного обмена между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ). Поставлена задача реализации алгоритмов автоматического ввода резерва (АВР) на базе лабораторного стенда автоматизированной системы управления электротехническим оборудованием (АСУ ЭТО) кафедры «Электрические станции» в соответствии со стандартом МЭК 61850 [1].

Реализация программно-технического комплекса выполнена в среде разработки *CodeSys* для контроллеров компании *WAGO*, поддерживающих обмен по стандарту МЭК 61850. В работе исследованы два различных варианта организации информационного обмена данными между устройствами по сети Ethernet. Первый подразумевает обмен данными между контроллерами в рамках среды программирования. Для второго варианта в качестве средства обеспечения цифрового обмена стандартом МЭК 61850 предусмотрен *GOOSE*-сервис — инструмент для передачи данных о состоянии оборудования [2].

Рассмотрены вопросы формирования файлов информационной модели на языке *SCL* и пакетов передаваемых данных. Данный анализ позволит улучшить понимание основ организации цифрового обмена и структуры информационной модели оборудования, раскроет возможности специализированного конфигууратора, позволяющего связать информационный обмен и алгоритмическое обеспечение ИЭУ.

Литература

1. **Трофимов А.В.** Управление электродвигателями собственных нужд в АСУ электроустановок: учебное пособие. М: Издательство МЭИ, 2010.
2. **Трофимов А.В., Поляков А.М.** Основы организации микропроцессорных автоматизированных систем управления технологическими процессами электроустановок. М: Издательство МЭИ, 2013.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

*Председатель секции — к.т.н., доцент Т.А. Шестопалова
Секретарь секции — зав. учебной лабораторией Д.Н. Кунакин*

Д.В. Абакумов, студ.; рук. Б.И. Силаев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ВЫБОР ОСНОВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НИЖНЕ-НИМАНСКОЙ ГЭС

Река Ниман относится к рекам дальневосточного типа, преимущественно дождевого питания. Для этих рек характерны высокая водность в теплое время года с мая по сентябрь, обусловленная паводочным режимом в этот период и низкая зимняя межень.

Последнее самое сильное за всю историю наблюдений наводнение на Дальнем Востоке заставило задуматься о реализации комплексных мероприятий, нацеленных на снижение ущерба в регионе от подобного рода стихийных бедствий. Поскольку наиболее эффективным способом борьбы с наводнениями является строительство регулирующих водохранилищ, способных задерживать паводковый сток, встал вопрос о разработке программы строительства противопаводковых гидроузлов в бассейне реки Амур. Одним из таких проектов является строительство Нижне-Ниманской ГЭС, выбор основного энергетического оборудования которой стал предметом исследования.

Выбор оборудования осуществлялся по главным универсальным характеристикам турбин. Он обладает достаточно высокой точностью расчета, но не имеет наглядности, поскольку анализ всех конкурирующих вариантов выполняется по главным универсальным характеристикам одного агрегата без рассмотрения станционных характеристик [1]. Были выполнены водно-энергетические расчеты режима работы ГЭС в маловодном году, и в среднем по водности году рассчитаны параметры ГЭС.

По результату расчетов были намечены два варианта: 1) четыре гидроагрегата с гидротурбиной РО 140-В-425 и гидрогенератором СВ-712/227-30; 2) шесть гидроагрегатов с гидротурбиной ПЛД140-В-335 и гидрогенератором СВ-1240/246-20. Выработка электроэнергии при первом варианте на 6 % меньше чем при втором. Из-за заглубления рабочего колеса расчет капиталовложений в строительную часть, связанных с основным энергетиче-

ческим оборудованием для первого варианта на 73 % меньше чем для второго; в итоге при расчете экономического обоснования варианта основного энергетического оборудования суммарные затраты по энергосистеме для первого варианта на 39 % меньше чем для второго варианта.

Литература

1. **Александровский А.Ю., Силаев Б.И.** Водноэнергетические и энергоэкономические расчеты при проектировании ГЭС: учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 1988. 60 с.

А.М. Антонова, асп.; рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОДНЫЙ БАЛАНС ВОДОХРАНИЛИЩА

За счет водохранилищ ГЭС обеспечиваются потребности населения (питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения), промышленности и энергетики, водного транспорта, сельского хозяйства, рыбного хозяйства и других водопользователей. Поэтому качественный количественный анализ водных ресурсов водохранилищ ГЭС и прогноз притока имеют большое значение при краткосрочном и долгосрочном планировании режимов работы ГЭС. Актуальность этого вопроса возрастает в маловодные годы.

Неточность в оценке может быть вызвана множеством факторов: отсутствием достоверных прогнозов притока, нагонными/сгонными ветровыми явлениями, неточностью измерений отметок, неточностью учета расхода ГЭС, береговым регулированием.

Как правило, в водохозяйственных и водноэнергетических расчетах береговое регулирование стока не учитывается [1]. Для водохранилищ многолетнего регулирования при изменении отметок от НПУ до УМО происходит увеличение стока за счет воды, накопленной в берегах, а при наполнении от УМО до НПУ — уменьшение за счет дополнительной фильтрации в берега.

Этот процесс можно записать в виде уравнения водного баланса для временного интервала Δt :

$$Q_{\text{акк}} \Delta t = (Q_{\text{пр}} - Q_{\text{отб}} \pm Q_{\text{льдообр.}} - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{нб ГЭС}} \pm Q_{\text{ф.берег}}) \Delta t, \quad (1)$$

где $Q_{\text{акк}}$ — расход аккумуляции; $Q_{\text{пр}}$ — приток; $Q_{\text{отб}}$ — отбор воды из водохранилища; $Q_{\text{льдообр.}}$ — расход на льдообразование; $Q_{\text{ф}}$ — фильтрационный расход; $Q_{\text{нб ГЭС}}$ — расход в нижний бьеф ГЭС; $\pm Q_{\text{ф.берег}}$ — дополнительный приток и дополнительная фильтрация в берега соответственно [2].

Эффект берегового регулирования зависит от гидрогеологических параметров береговой зоны водохранилища и от глубины сработки водохранилища.

Учет берегового регулирования при проектировании ГЭС увеличит гарантированную зимнюю мощность ГЭС.

Литература

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. Л.: ГИМИЗ, 1952.
2. Литвин Н.К. Методика определения энергетического эффекта берегового регулирования водохранилищ каскада ГЭС: Автореф. дис.... канд. техн. наук: М., МЭИ, 1989. 20 с.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ МЬЯНМЫ

В 2014 году в Мьянме было выработано 12 млрд кВт·ч электроэнергии, а потребность в электроэнергии составляла 14,5 млрд кВт·ч. Удельное электропотребление на человека составляло всего 200 кВт·ч/год [1]. Уровень электропотребления в Мьянме является самым низким по сравнению с соседними развивающимися странами.

Централизованным снабжением электроэнергией обеспечено только 30 % населения Мьянмы (в основном городского населения). Более 70 % населения занимается сельскохозяйственным производством, не имеющим связи с ОЭС Мьянмы. Стоимость электроэнергии централизованного потребителя 3,5—7,5 цент/(кВт·ч). Стоимость же электроэнергии в селах — намного выше (порядка 50—90 цент/(кВт·ч)), так как электроснабжение этой части населения осуществляется за счет использования дорогих бензиновых или дизельных электрогенераторов [1]. В настоящее время в Мьянме самой актуальной проблемой является нехватка электроэнергии.

В то же время немаловажной является и необходимость решения проблемы теплоснабжения и охлаждения жилых домов в стране, которая пока еще не рассматривалась комплексно с проблемой электроснабжения автономных потребителей Мьянмы.

В Мьянме преобладает муссонный климат с тремя основными сезонами: влажный — с конца мая по конец октября, прохладный — с конца октября по середину февраля, жаркий — с середины февраля по конец мая. В жаркий сезон среднемесячная температура составляет выше +30 °С во многих частях Мьянмы. В горных районах и северных частей страны гораздо прохладнее (температура ночью в прохладном сезоне иногда достигает -5 °С), в долинах температура не превышает +20 °С. Подобные резкие колебания температуры в течение года и по территории страны настоятельно требуют решения указанной выше задачи.

Используемые сегодня в Мьянме пути решения проблемы теплоснабжения и охлаждения помещений весьма неэкономичны для небогатого сельского населения. Одним из возможных путей решения этой проблемы могут быть энергокомплексы, базирующиеся на использовании солнечной энергии, источников низкотемпературного тепла и дизельных энергоустановок, которые с успехом реализуются в соседних с Мьянмой странах, находящихся в аналогичных климатических условиях.

Литература

1. **Dapice D.** Electricity Demand and Supply in Myanmar [Электронный ресурс]. URL: <http://ash.harvard.edu/>

В.Д. Безукладников, студ.; рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕТЕВОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В последние годы энергетическая стратегия многих развитых стран мира направлена на строительство сетевых солнечных электростанций большой мощности. В Российской Федерации в 2014 году была введена в эксплуатацию СЭС мощностью 5 МВт в селе Кош-Агач — первая в Сибири солнечная электростанция.

При проектировании и эксплуатации сетевых солнечных электростанций необходимо учитывать принципиальные отличия в технологии получения электроэнергии на СЭС от традиционных синхронных генераторов на АЭС, ТЭС, ГЭС и разное влияние на устойчивость и режимы работы энергосистем. Основными существенными недостатками внедрения фотоэлектрических электростанций являются вероятность мгновенного снижения генерации до 20 % номинальной мощности в случае пасмурной погоды (затенение) и, как следствие, негативное влияние на энергосистему [1]. При возникновении различного типа коротких замыканий в электрической схеме СЭС существует ряд особенностей, влияющих на выбор релейной защиты, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации СЭС [2]. Для постановки проблем, существующих при эксплуатации СЭС, появляется необходимость в моделировании различных режимов работы солнечной электростанции.

В работе был разработан проект существующей Кош-Агачской сетевой СЭС. Ресурсы солнечной энергетики определены по трем базам данных. Выбор модели и количества солнечных модулей, расположение на заданной территории, а также электрическая схема солнечной электростанции проводился на основании реальных данных, полученных после строительства Кош-Агачской СЭС. Были проведены численные эксперименты для исследования установившихся, а также неустойчивых режимов работы СЭС. Рассчитаны основные электрические параметры СЭС в различных режимах работы. В работе представлены результаты моделирования установившихся и неустойчивых режимов работы солнечной электростанции, а также анализ полученных результатов.

Литература

1. **Момот В.Е., Вишневский Н.В.** Анализ влияния солнечных фотоэлектрических электростанций на режимы работы энергосистемы [Электронный ресурс]. URL: сайт кню.end.ua Украина, 2012.
2. **Jay Johnson** Differentiating Series and Parallel Photovoltaic Arc-Faults. Los Gatos. CA. 95032. USA.

*А.Б. Васенин, соиск.; рук. О.В. Крюков, д.т.н., доц., гл. спец.
(АО «Гипрогазцентр», г. Н. Новгород)*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Новые интеллектуальные системы электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники стимулируют создание энергоэффективных ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1]. Сегодня к возобновляемым автономным источникам энергии на базе ВЭУ предъявляются более высокие требования, особенно для объектов повышенной опасности [2, 3]. Типовые решения автономных систем электроснабжения с ВЭУ не обеспечивают создание конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения на основе принципов SMART GRID [4,5].

При автономной работе электросетей с различными потребителями электроэнергии на нее воздействуют с разной степенью интенсивности сразу несколько внешних возмущений стохастического и детерминированного характера: технологические (ветровой поток, режимы работы традиционных источников энергии, график потребления) и природные (температура, природные возмущения). При разработке нового решения необходимо:

- провести анализ вариантов САР мощности ВЭУ с учетом их ресурса;
- сопоставить совместимости «плавного — жесткого» регулирования;
- создать имитационные модели регуляторов с инвариантными алгоритмами;
- разработать инвариантную по мощности систему автономных ВЭУ;
- сопоставить данные анализа компьютерного моделирования.

Результаты исследования работы энергоэффективных ВЭУ:

- повышение мощности ВЭУ в режиме рабочих ветров до 5—7 %;
- строгая стабилизация мощности ВЭУ в режиме ограничения;
- достоверное прогнозирование технического состояния ВЭУ.

Литература

1. **Крюков О.В., Титов В.В.** Разработка АСУ автономными ветроэнергетическими установками // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 35—37.
2. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло и др.; под ред. О.В. Крюкова. Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. 560 с.
3. **Крюков О.В., Серебряков А.В.** Система оперативной диагностики технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. 2015. № 4.
4. **АСУ систем** электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков, А.С. Плехов// Автоматизация в промышленности. 2012. № 4. С. 36—38.
5. **Серебряков А.В., Крюков О.В.** О новых возможностях технологий SMART GRID // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 2.

Е.А. Вольмер, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЭС ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОДЕФИЦИТА НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

В работе проводится оценка эффективности строительства крупных ВЭС для снижения энергодефицита на территории Алтайского края.

Для выбора перспективных площадок под крупные ВЭС были проведены расчет и анализ ветровых ресурсов на всей территории Алтайского края по данным 25 метеостанций с сайта «Погода России» на высоте 10 м [1, 2]. По полученным данным были построены карты распределения ветровых ресурсов на высотах 10 и 100 м, анализ которых позволил выявить наиболее перспективные районы для строительства крупных ВЭС на территории Алтайского края. Окончательно в качестве площадки было выбрано место вблизи города Яровое с доступной площадью 14,5 км². Моделирование ресурсов ветра на площадке ВЭС проводилось по данным метеостанции Славгород, удаленной на 5 км от площадки ВЭС.

Выбор энергоэффективной модели ВЭУ проводился из 10 вариантов ВЭУ с различными высотами башен в соответствии с действующими российскими стандартами ГОСТ Р 54435—2011, ГОСТ Р 51991—2002 по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности. Моделирование ресурсов ветра на высоту башни ВЭУ осуществлялось по теоретическому распределению Вейбулла, выбранному из двух моделей (Вейбулла и Гринцевича) по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения от фактической повторяемости скорости. В качестве энергоэффективных моделей для ВЭУ с высотой 80—85 м выбрана установка ev100 производства Eviag, а 95—100 м — K110 производства Kenersys. Исследование влияния высоты башни ВЭУ на ее выработку позволило принять окончательное решение о выборе энергоэффективной модели — ВЭУ модели K110 производства Kenersys.

Также в условиях площадки ВЭС была получена эмпирическая зависимость для оценки энергоэффективности любой модели ВЭУ без проведения ветроэнергетических расчетов.

Строительство крупной ВЭС (93,6 МВт), что составляет около 6,3 % установленной мощности энергосистемы Алтайского края, позволит снизить энергодефицит в данном регионе на 3,12 %.

Литература

1. **Основные** характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачёв, Т.А. Шестопалова. М.: Издательство МЭИ, 2012. 257 с.

2. **Российский** метеорологический сайт «Погода России» <http://www.info.space.ru>

*Д.В. Воротынцев, Н.Д. Карпов, Я.Л. Муравицкий, студенты;
рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОРСКОГО АВТОНОМНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО БУЯ

Исследования течений на шельфе Черного моря особенно актуальны и перспективны: информация о них используется для инженерных расчетов, обеспечивающих разработку нефтегазовых месторождений и исследований, связанных с изучением сопутствующих этой деятельности загрязнений морской среды. Одним из наиболее часто применяемых в океанологии методов изучения поверхностных течений является метод поплавков. Суть метода заключается в отслеживании передвижения по поверхности моря специального поплавка — буя [1]. Однако проблема такого буя заключается в малом времени автономной работы из-за недостаточной емкости питающих аккумуляторов.

В ходе выполнения работы авторами:

- рассмотрены существующие технические схемы обеспечения электроэнергией автономного исследовательского буя;
- получены характеристики энергопотребления контрольно-измерительной и передающей аппаратуры буя;
- предложены, проанализированы и рассчитаны два технических подхода к энергосбережению буя — с помощью солнечных фотоэлектрических преобразователей и линейного электромеханического генератора [2], использующего энергию поверхностных волн;
- на основе солнечных фотоэлектрических преобразователей реализован экспериментальный образец исследовательского буя.

Экспериментальная эксплуатация буя с солнечными фотоэлектрическими преобразователями, проведенная сотрудниками географического факультета МГУ океанологических исследований в акватории Черного моря, показала эффективность предложенных решений, что позволило увеличить время автономной работы буя с нескольких дней до трех месяцев. В ближайшие планы исследовательской группы входит продолжение исследований, разработка более эргономичной конструкции исследовательского буя.

Литература

1. **Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.** Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС-мониторинга // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 3. С. 62—70.
2. **Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.** Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: Корона принт, 2004. 368 с.

Зай Яр Лин, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ, ВЕТРОВОЙ, ПРИЛИВНОЙ И МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГИИ МЬЯНМЫ

Мьянма — развивающаяся страна в юго-восточной Азии. По современным данным технические ресурсы гидроэнергии для северных горных районов Мьянмы составляют 24 ТВт·ч/год [1].

В данной статье приведены результаты оценки технического потенциала солнечной, ветровой, приливной и малой гидроэнергии для разных районов Мьянмы, полученные по следующим формулам [2]:

$$\mathcal{E}_{сэ} = N_{см} \cdot 8760 \cdot S_i \cdot 10^6; \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{вэ} = 1/20 \cdot N_{ВЭУ} \cdot 8760 \cdot S_i; \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_{мгэ} = N_{мгэ-i} \cdot 8760. \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{сэ}$, $\mathcal{E}_{вэ}$, $\mathcal{E}_{мгэ}$ — технико-экологические потенциалы солнечной, ветровой и малой гидроэнергии, кВт·ч/год; S_i — площадь i -й заданной зоны, км²; $N_{см}$ — выработка солнечного модуля, кВт; $N_{ВЭУ}$ — мощность ветроэнергетической установки, кВт; $N_{мгэ-i}$ — мощность малой гидроэнергии i -го водотока, кВт.

Суммарные технические ресурсы солнечной энергетики Мьянмы составляют 2814,6 ТВт·ч/год.

Для определения технического потенциала ветровой энергетики были рассмотрены три типа ВЭУ китайского производства. Потенциал при использовании установок FD 4.0 (3 кВт) составляет 34,5 ТВт·ч/год, при использовании установок Hummer 6.4 (5 кВт) — 70,9 ТВт·ч/год и Hummer 8.0 (10 кВт) — 97,5 ТВт·ч/год.

Итоговый технический потенциал для Мьянмы получился равным 169,9 ТВт·ч/год при использовании гидроагрегатов ZZ/ZDK02.

Обычно, учитывая возможные потери мощности и энергии на ПЭС, технический потенциал приливной энергии приближенно оценивают в 33 % валового [2]. Тогда технический потенциал приливной энергии терриориальных вод Мьянмы составляет 3883 ТВт·ч/год.

Литература

1. Чан Ньен Аунг Тан, Малинин Н.К., Пугачёв Р.В. Оценка ресурсов малой гидроэнергетики северных горных районов Республики Союза Мьянма // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. 37—42 с.

2. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина и др.; под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

*А.В. Киричев, Е.И. Климов, студенты (ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск);
рук. В.А. Панченко, к.т.н., зав. лаб. (ФГБНУ ВИЭСХ, Москва)*

РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРИМЕНЕНИЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ТИПОВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В КОНТЕКСТЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА И РЫНКА ПРЕДЛОЖЕНИЯ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ И КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

По мнению специалистов стимулирование распространения собственной генерации энергии является актуальным направлением региональной энергетической безопасности для значительного (около 70 %) количества зон децентрализованного энергоснабжения РФ [1]. Однако даже районы, относящиеся к зонам централизованного энергоснабжения, такие как Московская область и Краснодарский край, зачастую энергодефицитны.

Потенциал солнечной энергии и климатические условия в рассматриваемых регионах позволяют решать задачи получения возможности автономного энергоснабжения потребителей путем использования СЭУ в индивидуальных хозяйствах. Так как потенциал производства тепловой энергии в Краснодарском крае в 2,4 раза больше (197,7 тыс. т у.т.), чем в Московской области по климатическим условиям [2], в данном регионе рекомендуется применение солнечных коллекторов (СК). В то же время снижение потенциала выработки электроэнергии в Краснодарском крае в 2 раза по сравнению с Московской областью [2] диктует рекомендацию по использованию преимущественно фотоэлектрических модулей в Московской области. Обзор производителей в рассматриваемых регионах показал преобладание производства солнечных модулей в Краснодарском крае над производством СК. Следовательно, необходимо развивать производство СК в Краснодарском крае для выполнения вышеуказанных рекомендаций.

Литература

1. **Попель О.С.** Перспективные ниши и технологии использования возобновляемых источников энергии в России // Ползуновский вестник. 2012. № 4.
2. **Справочник** по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / П.П. Безруких, В.В. Дегтярев и др. М.: ИАЦ «Энергия», 2007.

*А.С. Лопес Сааб, асп.; рук-ли Р.В. Пугачёв, к.т.н., доц.;
В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ВЕНЕСУЭЛЕ

Мировые ресурсы нетрадиционной нефти огромны и оцениваются в несколько раз больше, чем традиционные ресурсы. Фактически около 30 % мировых резервов нефти считаются традиционными, остальные запасы подразделяются на тяжелую нефть, сверхтяжелую нефть и битум. Венесуэла — одна из стран, которая содержит самые крупные в мире запасы нетрадиционных нефтяных ресурсов.

Характеристики венесуэльской нефти (тяжелая нефть, сверхтяжелая нефть и нефтеносные пески) приводит к необходимости использования тепловых методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП).

Пар для операций теплового метода ПНП на основе пара (П-ПНП) обычно вырабатывается с использованием прямоточных паровых генераторов. Для Венесуэлы, обладающей значительным приходом солнечной радиации, целесообразно использовать солнечную энергию для производства пара.

Большинство П-ПНП требуют непрерывного нагнетания пара. Однако пар, получаемый с помощью солнечной энергии, зависит от изменений времени суток и сезонов, что приводит к неустойчивости процессов производства пара в дневное-ночное время, а также при смене сезонов. Однако в некоторых исследованиях доказано, что на эффективность добычи нефти влияет общий объем пара, закачанный за определенный промежуток времени. Следовательно, с точки зрения добычи нефти пар, производимый солнечной энергией, является приемлемой альтернативой постоянного режима нагнетания пара.

Для района Бачакеро республики Венесуэла был выбран тип и ориентация параболоцилиндрического концентратора (ПЦК), тип и температура рабочей жидкости, рассчитано общее число ПЦК.

Проведенные расчеты показывают, что установка 84 ПЦК, 42 параллельных рядов по 2 ПЦК в каждом ряду, обеспечивает 100 % потребности в паре для дня с высоким приходом солнечной радиации и 33,8 % по году в целом.

Если число ПЦК определяется по дню со средним приходом солнечной радиации, то 280 ПЦК обеспечивает 113 % потребности в паре для П-ПНП. Оптимальное количество ПЦК и параметры парогенератора определяется на основании технико-экономического сопоставления вариантов.

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЭС В МЬЯНМЕ

Мьянма — развивающаяся, тропическая страна, расположенная на западе Индокитайского полуострова. Мьянма находится недалеко от экватора, поэтому страна располагает огромными ресурсами солнечной энергии. По современным данным валовые ресурсы солнечной энергии Мьянмы составляют 1,15 млн ТВт·ч в год [1]. На рис. 1 показаны суточный приход солнечной радиации (СР) на приемную площадку (ПП) по всей территории Мьянмы и расположение планируемых солнечных электростанций (СЭС) Та Зи и Мин Вуна.

В Мьянме только 32 % населения получает электроэнергию от объединенной энергосистемы, поэтому на сегодняшний день солнечную энергию широко используют на базе солнечных фотоэлектрических установок для выработки электроэнергии. Недавно правительство Мьянмы подписало договор с американской компанией о строительстве Та Зи СЭС (300 МВт) и Мин Вун СЭС (220 МВт).

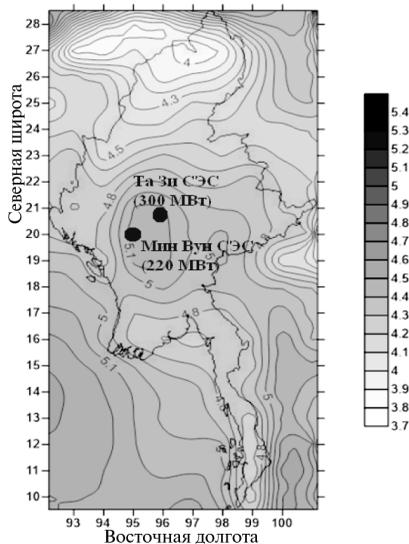


Рис. 1. Суточный приход СР на горизонтальную ПП Мьянмы и расположение планируемых СЭС Та Зи и Мин Вуна

Литература

1. Малинин Н.К., Пугачёв Р.В., Чан Ньен Аунг Тан. Исследование эффективности комплексного использования возобновляемых источников энергии в региональной энергетике Республики Союза Мьянма // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ. 2014. № 100(06). Шифр статьи: 1001406117. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/117.pdf>

*М.Е. Росендо Чакон, асп.; рук-ли Р.В. Пугачёв, к.т.н., доц.;
В.А. Кузнецова, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВЕНЕСУЭЛЫ

В настоящее время объединенная энергосистема Венесуэлы не покрывает всю территорию страны. В некоторых районах сельские жители производят собственное электричество, используя дизельные генераторы, однако в отдаленных районах не все могут себе этого позволить. В связи с этим для обеспечения электроэнергией автономных сельских жителей в Венесуэле, конкретно в области Алта Гуахира, сегодня особое внимание уделяется освоению солнечной энергетики.

Задачей работы явилось исследование параметров схем солнечного энергоснабжения на основе фотоэлектрических модулей для двух типов потребителей: со средним и низким уровнем энергопотребления.

В качестве элементов схем энергоснабжения рассматривались различные типы солнечных модулей и оценивалось влияние высокой температуры на их энергетические характеристики.

Показано, что наличие системы водяного охлаждения позволяет снизить число использованных модулей и получить достаточный объем горячей воды [1].

Так, для характерного потребителя использование системы охлаждения позволяет снизить число обычных кремниевых модулей с 19 до 14 шт., т.е. больше чем на 25 %.

Использование модулей с голографическим концентратором позволяет обеспечивать ту же нагрузку при установке 6 шт., а при наличии охлаждения — 3 шт. [2].

На базе проведенных исследований можно сделать вывод о значительном улучшении энергетических характеристик солнечных модулей с использованием голографического концентратора с системой охлаждения. Однако окончательный вывод о целесообразности ее установки можно сделать на основе технико-экономического расчета.

Литература

1. **Garg H.P. and Agarwall R.K.** Some aspects of a PV/T collector: forced circulation flat plate solar water heater with solar cells // *Energy Convers. Mgmt.* 1995. Vol. 36(2). P. 87—99.

2. **Jose E. Castillo-Aguilella.** «Non imaging applications of volume diffractive optics» department of electrical and computer engineering In the Graduate College the University of Arizona.

*Д.С. Сычёв, асп.; рук. А.Ю. Александровский, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ»)*

АКТУАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЕНИСЕЙСКОГО КАСКАДА

Колебания уровня воды в водохранилище сопровождаются перестройкой напряженно-деформационного и фильтрационного состояния массива в бортах водохранилища и в местах их примыкания к плотине, при этом происходит образование в массиве зон снижающейся прочности вследствие циклических изменений знака напряжений.

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС и гравитационная плотина Красноярской ГЭС весьма чувствительны к температурному режиму внешней среды: наружного воздуха и воды в водохранилище. Неучет влияния внешних факторов на выбор отметки заполнения водохранилища может негативно сказаться на состоянии плотины, так как монолитность бетона может быть нарушена при появлении в этой зоне растягивающих напряжений.

В данной работе предполагается разработка базового алгоритма определения оптимального режима наполнения и сработки водохранилища с учетом температурного состояния гидротехнического сооружения. Учет температурного воздействия должен осуществляться в процессе наполнения водохранилища до максимальной для данного года отметки уровня верхнего бьефа, а также при сработке водохранилища до отметки «мертвого объема».

Новизной данной работы является учет не только напряженно-деформационного состояния плотины от скорости сработки-наполнения водохранилища, но и температурного режима тела плотины. Представленные ограничения, безусловно, повлияют на экономические показатели работы ГЭС, которые потребуют дополнительного анализа и возможных методов адаптации к введенным требованиям для минимизации финансовых потерь.

Разрабатываемый алгоритм предполагает дальнейшие его доработки с учетом практической особенности его применения для каждой конкретной станции или выбранного каскада ГЭС.

К.М. Федоркив, студ.; рук. Г.В. Дерюгина, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЭС НА ТЕРРИТОРИИ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Дефицит выработки электроэнергии в Кемеровской области в среднем составляет 9307 млн кВт·ч (30 %). Для снижения энергодефицита и улучшения экологической ситуации в работе рассматривается дополнение ТЭК крупной ветроэлектрической станцией (ВЭС) мощностью 50 МВт.

Для выбора площадки под размещение ВЭС проведен подробный анализ энергетических характеристик ветра по специализированным базам данных (СБД) «Флюгер» и «Погода России» [1]. Валовой потенциал ветровой энергии Кемеровской области, приведенный к условиям открытой ровной местности, на высоте флюгера 10 м составил 2552,774 ГВт·ч в год. В программе Surfer-8 построены карты распределения удельной мощности и среднегодовой скорости ветра на высотах 10 и 80 м, по которым были намечены перспективные зоны для размещения ВЭС.

В работе обоснована модель теоретической повторяемости скорости ветра, в качестве которой в любой точке Кемеровской области рекомендовано аналитическое распределение Вейбулла, причем при наличии исходной информации по многолетнему ряду параметр α определяется по формуле Гарцмана, а при отсутствии — по аппроксимирующей зависимости (1), полученной автором:

$$\alpha(V_0) = 0,1227 V_0 + 1,0731, \quad (1)$$

где α — параметр функции распределения Вейбулла; V_0 — среднегодовая скорость ветра на высоте 10 м, м/с.

Площадка под размещение ВЭС была выбрана вблизи города Новокузнецк рядом с рекой Томь (координаты — 53,87° с.ш., 87,12° в.д).

Выбор энергоэффективной модели ВЭУ проводился по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ из 17 вариантов по данным СБД «Современное ветроэнергетическое оборудование» [2]. Была выбрана установка G87 с высотой башни 78 м с единичной мощностью 2 МВт. В результате на площадке ВЭС необходимо разместить 25 агрегатов.

Годовая выработка ВЭС с учетом потерь составила 90,52 млн кВт·ч. Для снижения энергодефицита на 30 % на территории данного региона рекомендуется построить около 30 аналогичных ВЭС.

Литература

1. **Российский** метеорологический сайт «Погода России» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.info.space.ru>

2. **Свидетельство** о государственной регистрации базы данных №2012620870. Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра» // А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов, заявл. 28.06.2012; опублик. 28.08.2012.

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Более 2/3 территории Якутии являются зоной децентрализованного энергоснабжения. Поскольку эта зона охватывает главным образом северную часть республики со сложными условиями доставки топлива, особенно острыми становятся проблемы энергетической безопасности.

В отдельных районах РФ энергоснабжение автономных потребителей осуществляется с применением возобновляемых источников энергии, в частности энергии ветра.

Для исследования выбрано село Сиктях Булунского района Республики Саха (Якутия) последующим характеристикам: 1) относительно небольшое население и положительная динамика роста; 2) отсутствие стабильного транспортного сообщения с ближайшим населенным пунктом для обеспечения поставок дизельного топлива; 3) наличие вблизи села алмазодобывающего карьера, который служит дополнительным источником рабочих мест; 4) наличием ДЭС малой мощности, не рассчитанной на расширение производства и увеличение численности населения. Территория относится к зоне арктической лесотундры, характерные черты которой — суровый и жесткий климат, короткое холодное лето, продолжительная суровая зима с большим снежным покровом.

Энергоснабжение осуществляется за счет ДЭС ОАО «Сахаэнерго» мощностью 260 тыс. кВт. Присоединенная нагрузка — 0,1 тыс. кВт. Годовой расход дизельного топлива составляет 148 т. При средней цене дизельного топлива 36 тыс. руб/т годовые затраты на топливо составляют около 5,5 млн руб/год.

Путем повышения энергоэффективности таких зон является максимальное использование местных возобновляемых энергоресурсов. В частности, примечательно, что зона децентрализованного энергоснабжения практически совпадает с зоной потенциальных ветроэнергоресурсов.

Повышение эффективности децентрализованного энергоснабжения может быть достигнуто путем внедрения комбинированного производства электрической и тепловой энергии. Для электроснабжения был выбран энергокомплекс, состоящий из ветроэнергетических и резервных дизельных установок. В дальнейшей работе для производства тепловой энергии будут использоваться теплонасосные установки.

На основе оценки ветроэнергетического потенциала местности, а также с учетом номинальных характеристик пригодного для работы в условиях Крайнего Севера ветроэнергетического оборудования для энергоснабжения была выбрана ВЭУ GE Energy 1.6—100 ($H_6 = 100$ м) с северо-восточной ориентацией.

Б.Т. Шохзода, асп.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (НВИЭ) год за годом становятся более перспективным направлением на фоне роста потребления энергии и цены на нее, уменьшения ископаемых топлив, изменения климата и возросших условий по защите окружающей среды, а также обеспечения безопасного энергопотребления в будущем. Очень важно использовать возобновляемые источники энергии [вода, солнце, ветер, тепло земли (геотермальная энергия), энергия волн], когда есть возможность даже в ситуации наличия традиционных источников энергии (нефть, газ, уголь). Также необходимо развивать и искать другие способы использования НВИЭ.

Республика Таджикистан, страдающая от повсеместного дефицита электроэнергии в зимнее время [1] при огромном потенциале гидроэнергии и имеющая хорошие климатические условия для развития солнечной энергетики, обязана развивать и использовать в первую очередь эти виды источников энергии для удовлетворения своих энергетических потребностей. Реализация установок на основе гидро- и солнечной энергии вследствие экономических и политических причин крайне мала. Принимая во внимание то, что большая часть населения находится в сельской и горной местности, проблему дефицита электроэнергии можно решить с помощью использования солнечной энергии. Учитывая все вышесказанное, в данной работе была проведена оценка потенциала солнечной энергии на территории Республики Таджикистан и возможности ее использования для решения поставленных проблем. Для оценки потенциала солнечной энергии и определения оптимального угла установки солнечных батарей используется среднемесячное значение солнечной радиации (СР), база данных NASA и часовые данные СР METEONORM [2, 3]. Полный текст работы и данные прихода солнечные радиации приведены на сайте www.solarenergy.tj.

Литература

1. **Энергетический** кризис в Таджикистане в зимний период // Отчет Всемирного банка.
2. **Расчет** ресурсов солнечной энергетики: учебное пособие / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательство МЭИ, 1998.
3. **METEONORM** Version 6.0.2.5 METEOTEST Fabrikstrasse 14 CH-3012 Bem Switzerland.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Председатель секции — к.т.н., доцент Я.Л. Арцишевский

Секретарь секции — к.т.н., доцент А.В. Орлов

Е.Н. Афанасьев, студ.; рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕГО ГРУНТА

В данной работе представлена методика расчета электрических полей (ЭП) воздушных линий (ВЛ) электропередачи с учетом диэлектрической проницаемости грунта, основанная на методе эквивалентных зарядов (МЭЗ). Актуальность решения такой задачи обусловлена тем, что действующий нормативный документ [1] требует учитывать характеристики грунта в таких расчетах.

При расчете ЭП в пролете ВЛ широко используется МЭЗ с бесконечными равномерно заряженными осями в качестве эквивалентных зарядов. Такая методика показала свою эффективность при расчете полей ВЛ, проходящих над хорошо проводящим грунтом, поскольку при этом можно использовать метод зеркальных отражений [2]. При расчете полей ВЛ, проходящих над плохо проводящими грунтами, применение метода зеркальных отражений приводит к недопустимым погрешностям, поскольку в [1] сказано, что при выполнении расчетов полей с помощью вычислительных алгоритмов и компьютерных программ погрешность не должна превышать 10 % значения напряженности.

В работе показано, что удовлетворительных результатов удастся добиться, используя МЭЗ с конечными равномерно заряженными отрезками в роли эквивалентных зарядов. Условием применимости такой методики является то, что длина таких отрезков должна быть много больше высоты подвеса проводов.

Для подтверждения правильности метода результаты, полученные на основе предложенной методики, были сопоставлены с результатами программы *BETAFields* [3], которая широко применяется для расчетов полей на кафедре ТЭВН МЭИ. Погрешность нашей предложенной методики не превышает 3 %.

Литература

1. **Электромагнитные** поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.4.1191-03. М.: Минздрав России, 2003.
2. **Белогловский А.А., Пашинин И.В.** Методы расчета электрических полей в примерах и задачах: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. **Ларин В.С.** Исследование и разработка эффективного метода расчета электрической прочности внутренней изоляции силовых трансформаторов. Техника высоких напряжений: дис... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2007.

*В.О. Бобров, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;
Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЕТЯХ 6—35 кВ И МЕТОДОВ ПРОВЕРКИ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На сегодняшний день феррорезонансные явления, вызванные насыщением магнитопроводов измерительных трансформаторов напряжения (ТН), остаются актуальной проблемой электрических сетей высокого напряжения. Имеющиеся антирезонансные конструкции ТН обладают повышенной стоимостью, поэтому предлагаются более экономичные технические решения. Однако внедрение новых разработок возможно только на основе предварительной проверки их соответствия техническим требованиям к подавлению феррорезонансных процессов, которые должны быть сформулированы в виде нормативного документа. Работа по созданию такого документа в настоящее время ведется в МЭИ совместно с ОАО «РЭТЗ Энергия».

При разработке конструкций антирезонансных трансформаторов большое значение имеет возможность численного моделирования феррорезонансных процессов. В настоящем докладе представлены результаты разработки расчетных моделей антирезонансных ТН, основанных на применении принципа дуальности [1], так как традиционные подходы к составлению схем замещения и расчетных моделей ТН обладают рядом существенных недостатков [2]. На основе этих моделей проведены расчеты феррорезонансных явлений в электрических сетях 6—35 кВ с измерительными ТН различных конструкций, определены области существования феррорезонанса на частоте 50 Гц и субгармониках. Аналогичные расчеты проводились для электрической цепи экспериментально-испытательного стенда для проверки феррорезонансных свойств ТН. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментом. По итогам работы предложены требования по совершенствованию схемы экспериментально-испытательного стенда и методу проверки антирезонансных свойств ТН, а также сформулированы направления дальнейшего совершенствования расчетных моделей ТН.

Литература

1. **Cherry E.C.** The Duality between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits // Proceedings of the Physical Society. Section B. 1949. Vol. 62. No 2.

2. **Матвеев Д.А., Никулов И.И.** Метод расчета погрешностей, основанный на детальном схематическом замещении // II международная конференция «Инновационные решения в области качества изготовления и надежности эксплуатации измерительных трансформаторов тока и напряжения», Санкт-Петербург, 10—12 декабря 2013 г.

*С.П. Васильев, А.В. Неилов, студенты;
рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ВЫДАЮЩИЙСЯ ЭНЕРГЕТИК

Дьяков А.Ф. — незаурядный инженер, талантливый организатор, руководитель производства, науки и высшего энергетического образования, крупный ученый с мировым именем. Неординарная личность, чей подход к преодолению трудностей вдохновляет многих и дает поверить в силу человеческого разума и духа. Анатолий Федорович обладал глубокими и многогранными, всеохватывающими знаниями и опытом работы на разных ответственных государственных должностях, пользовался большим уважением и непререкаемым авторитетом. Патриот, посвятивший свою жизнь развитию и совершенствованию энергетической отрасли родной страны.

Большой заслугой Дьякова А.Ф. является создание РАО «ЕЭС России» «с чистого листа», благодаря которому в то переломное время, когда рушился общественно-политический строй, был удержан в равновесии «каркас» страны — ее электроэнергетика. Анатолий Федорович производственную и руководящую деятельность активно сочетал с научной деятельностью в области энергетики. Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, автор и соавтор более 400 научных трудов, академик-секретарь Академии электротехнических наук России, президент Международной энергетической академии, член исполкома и административного совета Международной конференции по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE), председатель Российского национального комитета МИРЭС. С 1995 года возглавлял кафедру «РЗиАЭС» МЭИ.

При жизни Анатолия Федоровича им была выпущена книга «Да будет свет». Он анализирует пройденный путь, ищет собственные ответы на вопросы, поставленные перед ним жизнью. Нашему поколению уже не доведется лично пообщаться с Анатолием Федоровичем, но мы можем овладеть его идеями через его научные труды и произведения. Анатолий Федорович увековечил себя в своих книгах, а также в созданном им научно-образовательном центре «Надежность и эффективность РЗА в ИЭС с ААС» на базе программно-аппаратного комплекса RTDS, возможность которого уже использованы для совершенствования систем мониторинга и автоматического управления в ЕЭС России и на которой нам предстоит оттачивать свои знания.

Имя Дьякова А.Ф., выдающегося энергетика написано «золотыми буквами» в истории электроэнергетики Российской Федерации.

Литература

1. **Дьяков А.Ф.** Да будет свет. М.: Московская типография №2, 2007.

*П.Ю. Есипенко, Д.К. Шканов, студенты;
рук. А.А. Белоголовский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ОДИНОЧНЫХ КАТОДОНАПРАВЛЕННЫХ СТРИМЕРОВ В ВОЗДУХЕ

Параметры стримеров, распространяющихся в воздухе в одинаковых условиях, стохастически варьируются [1]. Одной из причин может быть случайный характер появления и развития инициирующих их электронных лавин и, значит, места лавинно-стримерного (ЛС) перехода. Цель работы состоит в теоретическом исследовании его влияния на параметры формирующихся катодонаправленных стримеров.

ЛС переход может произойти в середине разрядного промежутка или вблизи электрода. В первом случае он порождает двухголовочный стример, чья отрицательная головка распространяется в направлении анода, а положительная — к катоду. Если же лавина возникает вблизи анода и к моменту, когда она достигает его поверхности, ЛС переход еще не происходит, то стример формируется по-другому. Объемный заряд, оставленный лавиной в промежутке, усиливает внешнее поле, и в этом усиленном поле продолжается накопление заряда, ведущее в дальнейшем к появлению положительного (катодонаправленного) стримера, изначально не имеющего отрицательной головки.

Лавины и стримеры исследованы при помощи их гидродинамической математической модели [1], учитывающей дрейф электронов в поле, ударную ионизацию газа этими частицами, их прилипание и отлипание, рекомбинацию, фотоионизацию газа излучением разряда. В этой работе применены ее усовершенствованная модификация [2] и реализующие ее программы, созданные на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ».

Рассчитаны параметры стримеров, формирующихся при нормальных атмосферных условиях в заполненном сухим воздухом разрядном промежутке с однородным электрическим полем. Показано, что при прочих равных условиях скорость распространения и максимальная напряженность поля стримеров, возникших в середине промежутка, в 1,5-2 раза выше, чем у стримеров, появившихся у анода. Это различие помогает объяснить, по крайней мере, часть вариаций характеристик стримеров.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Бортник и др., под ред. И.П. Верещагина. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Белоголовский А.А. Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // *Электричество*. 2011. № 11.

Д.Г. Ефремов, И.Ю. Ефремова, аспиранты; рук. И.З. Глушкин, д.т.н.,
проф. (НИУ «МЭИ»)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

В настоящее время основными управляющими воздействиями (УВ), формируемыми устройствами противоаварийной автоматики для предотвращения развития крупных системных аварий, являются разгрузка турбины, отключение генератора и отключение нагрузки. Все перечисленные УВ имеют свои ограничения и обладают целым рядом недостатков. Для решения этой проблемы в настоящее время предлагается частично или полностью заменить вышеуказанные УВ на воздействия на накопители электрической энергии, такие как аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ), суперконденсаторы (СК), маховиковые накопители (МК) и сверхпроводниковые накопители энергии (СПИНЭ). Первым шагом в решении данного вопроса является моделирование накопителей и сопутствующих устройств для возможности анализа их использования для целей ПА.

В качестве устройства связи накопителя с сетью, обеспечивающего раздельное двухпараметрическое управление мощностью преобразователя (рис. 1), выбрана схема двухмостового тиристорного преобразователя (ТП) с буферными вентилями на базе полностью управляемых тиристоров [1].

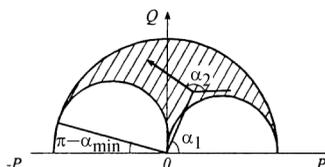


Рис. 1. Диаграмма двухпараметрического управления:

α_1, α_2 — углы управления ТП

Разработаны математические модели для СПИНЭ и МК в программном комплексе MatLab. МК моделировался на базе машины постоянного тока с постоянными магнитами с нулевой нагрузкой на валу с возможностью изменения момента инерции ротора. Проанализированы стандартные модели для СК и АББМ. Разработана тестовая схема для анализа работы накопителей через выбранный ТП с возможностью отображения требуемых контролируемых параметров.

Полученные результаты и модели позволят провести анализ возможности работы накопителей для предотвращения нарушения статической и динамической устойчивостей, который будет выполнен на следующем этапе работы.

Литература

1. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I. М.: «Знак», 2009.

*И.Ю. Ефремова, Д.Г. Ефремов, аспиранты;
рук. И.З. Глускин, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПУСКОВОЙ ОРГАН ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

В настоящее время при настройке пусковых органов противоаварийной автоматики (ПА) имеет место двухмашинное представление сложной многомашинной энергосистемы. При данном подходе приходится для каждого сечения выбирать худшую ситуацию по всей недоступной для контроля части энергосистемы. При расчете уставок пусковых устройств не учитывается изменение режима работы прилегающей сети. При этом пусковые устройства ПА имеют одну уставку для текущей схемы, рассчитанную исходя из худших условий. Данное упрощение не позволяет полностью использовать пропускную способность сечения, что снижает экономическую эффективность электропередачи [1]. Для повышения пропускной способности сечения необходимо отказаться от настройки пусковых органов ПА исходя из худших условий. Следует проводить данную настройку для существующего в реальном времени режима, учитывая режим работы прилегающей сети. Для этого необходимо осуществлять расчет статической устойчивости энергосистемы, утяжеление режима и выявление предельного режима и максимально допустимых перетоков мощности по условию статической устойчивости в реальном времени и по данным значениям перетоков мощности осуществлять расчет уставок пусковых органов ПА. Критерием устойчивости является равенство нулю свободного члена характеристического уравнения:

$$a_n = \det \frac{\partial W}{\partial X} = 0, \quad (1)$$

где W — вектор-функция, соответствующая уравнениям баланса мощности в узлах энергосистемы; X — вектор нерегулируемых параметров или зависимых переменных. Данный расчет периодически повторяется, уставка пускового органа ПА изменяется с изменением режима работы сети в реальном времени. При данной настройке устройство адаптируется к режиму работы энергосистемы, в результате чего сокращается количество излишних срабатываний, и повышается пропускная способность сечения и экономическая эффективность электропередачи.

Литература

1. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I. М.: «Знак», 2009.

Д.С. Журавкова, студ.; рук. А.Г. Темников, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ РАЗРЯДА ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

В настоящее время рассматриваются два возможных механизма инициирования молнии в грозовых облаках: 1) высокоэнергетическим космическим излучением (так называемый «пробой на убегающих электронах») и 2) на группах крупных гидрометеоров [1]. Второй механизм в последние годы привлек особый интерес не только с точки зрения определения условий, оптимальных для инициирования гидрометеорами разряда молнии в грозовых облаках, но и выявления возможности искусственного инициирования молнии в грозовом облаке и между облаком и землей.

Использование уникальной экспериментальной установки «Гроза» позволило установить особенности инициирования и распространения разрядов из искусственного грозового облака в присутствии гидрометеоров.

Выявлено существенное влияние формы и размеров гидрометеоров, их количества в группе, места расположения в облаке и вблизи него на формирование разряда между искусственным грозовым облаком и землей. Найдено, что плоские модельные гидрометеоры, расположенные вблизи границы заряженного облака, не инициировали искровых канальных разрядов, так как на них возникала лавинная корона, которая разряжала заряженное облако. Установлено, что группа крупных модельных гидрометеоров вблизи границы заряженного облака может инициировать разряд между облаком и землей и влиять на его распространение и характеристики. При этом не все гидрометеоры в группе обязательно принимают участие в формировании разряда из искусственного грозового облака. Найдено, что финальная стадия разряда (оптическое и электромагнитное излучение и ток) становится в 1,5—3,0 раза слабее по сравнению с разрядом без модельных гидрометеоров. В то же время в присутствии модельных гидрометеоров в промежутке в среднем на 15—30 % возрастает величина заряда, нейтрализованного в течение финальной стадии разряда из искусственного грозового облака. Установлено, что в присутствии гидрометеоров в спектре электромагнитного излучения разряда растет доля частот в диапазоне от 200 до 600 МГц.

Литература

1. **Rakov Y.A., Uman M.A.** Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ PSCAD ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОВЕРКЕ АЛГОРИТМОВ РЗА

Для получения надежного устройства РЗ необходима его качественная и полноценная проверка на всех этапах реализации, начиная от испытаний алгоритмов защит [1] на математических моделях и заканчивая проверкой готового устройства в целом. Это очень объемный по времени и трудозатратам процесс, который в общей сложности может продолжаться в течение нескольких месяцев. Но даже такого объема не всегда бывает достаточно, поэтому перед нами стоят две основные задачи — повышение качества тестирования и уменьшение временных затрат на него. Решение этих задач невозможно без введения автоматизированных проверок, благодаря которым участие разработчика сводилось бы к минимуму, т.е. требовалось только запустить проверку и оценить ее результаты. Поставленных целей удалось достичь путем использования специализированного ПО и разработкой испытательного аппаратного комплекса.

Одним из средств, применяемых при разработке и проверке устройств РЗ, является программный комплекс PSCAD. Это комплекс, позволяющий моделировать процессы, происходящие в энергосистемах в различных режимах работы [2]. PSCAD получил признание инженеров по всему миру за точность моделирования режимов, удобство настройки, обширную библиотеку, включающую первичное оборудование, такое как трансформаторы, генераторы, двигатели, различные фильтры, преобразователи, логические элементы. При этом все параметры элементов понятны инженеру-энергетику и могут быть найдены в справочниках, что является большим преимуществом данной программы.

Литература

1. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. **Программная** среда моделирования энергосистем PSCAD. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.enlmlab.ru/stati/PSCAD%20EnLAB/>

*В.А. Кадах, И.А. Морсин, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В России наибольшее распространение имеют вводы с бумажно-масляной изоляцией. Способ намотки узкой бумажной ленты по винтовой линии вполнахлеста позволил изготавливать вводы любых размеров на все применяемые в стране напряжения.

В работе были рассмотрены проходные изоляторы, используемые при вводах высокого напряжения внутрь металлических баков высоковольтных трансформаторов.

Была построена модель проходного изолятора (токоведущий стержень, охваченный изоляцией «цилиндрической» формы с заземленным фланцем) с помощью программы ELCUT. На полученной модели показаны места наиболее вероятного электрического пробоя. Смоделирован случай включения концентрически установленного одного цилиндрического конденсатора: одна пластина, согласно установленным теоретической базой пропорциям. Наблюдаемая картина показала «сглаживание» нормальной составляющей напряженности поля, что указывает на понижение вероятности аварийного выхода из строя высоковольтного ввода, не дающего экономически выгодного многократного продления срока службы исследуемого изолятора. Поэтому была рассмотрена модель с привнесением нескольких концентрически установленных через минимально возможное расстояние цилиндрических пластин. В результате мы наблюдали практически полное «гашение» краевого эффекта. Полученные результаты были подтверждены экспериментально при помощи моделирования на проводящей бумаге с использованием проводящего клея [1]. Такое решение заметно уменьшит вероятность аварии и нарушения целостности изоляции, что в свою очередь уменьшит финансовые убытки на обслуживание.

Литература

1. **Педро И.И., Машковцева М.Н.** Использование моделирования на проводящей бумаге для исследования электростатических полей при определении качества изоляции // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов XXI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. Т. 4. С. 287.

А.А. Калугина, студ.; рук. А.А. Белогловский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» разработан пакет программного обеспечения (ПО) для математического моделирования лавинного и стримерного электрического разряда в воздухе. Стримерный разряд в воздухе представляет собой трехмерную нестационарную структуру, развивающуюся в пространстве и времени. Ее формирование определяют одновременное развитие в разрядном промежутке множества стримеров и их ветвление.

Описание электронных лавин и стримеров построено на базе их трехмерной гидродинамической модели [1], учитывающей дрейф свободных электронов в электрическом поле, ударную ионизацию газа электронами, их прилипание и отлипание, рекомбинацию, фотоионизацию газа излучением разряда. Реализующее ее ПО моделирует формирование лавины, лавинно-стримерный переход, развитие одиночного стримера, одновременное распространение в разрядном промежутке нескольких стримеров, их ветвление [2]. Оно выполняется на персональном компьютере (ПК), работающем под управлением 32- или 64-разрядной операционной системы Windows 7/8. Составляющие его программы используют многопоточные вычисления, что в совокупности с применением экономичных конечно-разностных численных методов [3] для решения уравнений модели обеспечивает высокую скорость расчетов.

Созданные программы сделали трехмерное моделирование стримерного разряда не уникальным актом, требующим экстраординарных вычислительных затрат, а рабочим инструментом, доступным пользователю мощного ПК и позволяющим детально исследовать трехмерные особенности распространения стримеров в пространстве, их ветвления и параллельного развития.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Белогловский А.А. Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // *Электричество*. 2011. № 11.
3. **Павленко А.М., Белогловский А.А.** Об экономичной методике расчета самосогласованных электрических полей с объемным зарядом // *Электричество*. 2009. № 5.

Р.И. Канафеев, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР И ПАРАМЕТРОВ АРВ СГ, РАБОТАЮЩИХ В РАЗНЫХ СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ СИТУАЦИЯХ

В настоящее время в энергосистеме РФ происходит активная модернизация систем возбуждения генераторов. Модернизация обусловлена как физическим износом, так и моральным старением оборудования систем возбуждения. В связи с тем, что в результате модернизации увеличивается быстродействие систем возбуждения и регуляторы возбуждения предыдущих поколений заменяются современными цифровыми регуляторами возбуждения на базе микропроцессорной техники, ставится задача выбора новых настроек регуляторов возбуждения, обеспечивающих эффективное демпфирование электромеханических колебаний.

До сих пор для настройки регуляторов использовались классические методы, в которых составлялась целевая функция для оптимизации качества функционирования АРВ СГ, работающего в разных схемно-режимных ситуациях. К известным методам составления целевых функций относятся методы, основанные на корневых и частотных критериях оценки качества регулирования [1].

Имеется тенденция к увеличению числа оптимизируемых настроечных параметров по мере усложнения алгоритма функционирования регулятора и структуры АСР, что в значительной степени усложняет поставленную задачу, делая результат решения обоснованным лишь при определенных ограничениях и допустимых приемах декомпозиции.

В этих условиях достаточно надежное решение поставленной задачи практически возможно только численными методами пошаговой оптимизации целевой функции, зависящей от настроечных параметров анализируемой системы.

Возможности современной вычислительной техники существенно расширяют спектр методов оптимизации и имитационного моделирования.

Вследствие этого в настоящее время появляется все большее количество вариантов АРВ и PSS, а также методов их синтеза, которые требуют сравнительного анализа, а также выявления преимуществ и недостатков каждого из них.

Литература

1. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы М.: Физматлит, 2006.

*Е.Л. Ковалёва, студ.; рук-ли А.В. Орлов, к.т.н., доц.;
А.Ю. Скороходова, асс. (НИУ «МЭИ»)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА СПЕКТРОГРАММЫ ИМПУЛЬСА ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ИЗ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

Создание разрядных явлений между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и заземленной поверхностью преследует цель моделирования реальных разрядных явлений в природе, позволяющего изучить физические процессы, происходящие в разрядных явлениях [1].

Для понимания случившегося явления необходимо в первую очередь выявить закономерности между формами осциллограмм тока импульсов и спектральной плотностью, ведь инициализация модели в реально существующей среде позволит более точно предсказывать последствия ударов молнии, что и было проработано в исследовании.

В данной работе были проанализированы 133 осциллограммы тока импульсов электрического разряда, которые с помощью Фурье-анализа были преобразованы в графики спектральной плотности тока, предварительно разделенные на несколько категорий по количеству импульсов.

В результате исследования была выявлена закономерность между видами осциллограммы тока и спектральной плотностью. Оказалось, что чем больше «остроконечность» импульса, тем более плавная характеристика спектральной плотности тока ей соответствует. Если импульс тока представляет собой некоторую «ломаную», то график спектральной плотности имеет неравномерный характер с выраженными пульсациями.

Кроме того, выполнена статистическая обработка результатов, построены гистограммы распределения амплитуд токов разрядных явлений и рассчитаны наиболее вероятные проявления числовых характеристик, таких как длительность импульса (0,3—0,4 мкс), длительность фронта (0,1 мкс), максимальные значения спектральной плотности тока (2—3 А·с) [2].

Эти данные позволят более точно моделировать молнию в пределах экспериментального комплекса, а также определить связь между смоделированным и реальным природным явлениями. Полученные результаты могут помочь в задаче совершенствования защиты наземных объектов и летательных аппаратов от ударов молнии.

Литература

1. **Бортник И.М.** Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. **Темников А.Г., Орлов А.В.** Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 52—59.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Как правило, при исследовании электромеханических переходных процессов (ЭМПП) генераторов средней и большой мощности активные сопротивления обмоток статора, а также элементов сети, например линий связи, трансформаторов допустимо не учитывать в силу их малого значения [1]. Таким образом, электрической энергией, преобразующейся в тепло в активных сопротивлениях, пренебрегают так же, как и пренебрегают энергией, потребляемой системой возбуждения.

Вышеуказанные допущения справедливы для машин средней и большой мощности, однако это не всегда дает достаточные результаты при расчетах ЭМПП [2] генераторов малой мощности, при исследовании которых следует учитывать следующее:

- активную составляющую сопротивления элементов сети;
- активную составляющую сопротивления обмоток генератора;
- небольшие значения постоянной инерции T_j агрегата.

Таким образом, в сопротивлении контура тока КЗ присутствует значительное по величине активное сопротивление, и отклонение скорости вращения малого генератора будет иметь меньшее значение по величине, а в ряде случаев и отличаться по знаку. То есть ЭМПП малых синхронный генераторов может иметь качественно другой вид. Это объясняется уменьшением разности между механической мощностью турбины и электрической мощностью генератора при КЗ за счет присутствия потерь активной мощности на нагрев элементов сети. Также необходимо учитывать, что при значительной активной составляющей сопротивления в контуре тока КЗ наблюдается явление теплового спада тока. Рассмотренные выше аспекты учтены в расчетах, проведенных автором, и показывают пределы увеличения допустимого времени отключения КЗ, что важно учитывать при разработке алгоритмов защиты противоаварийной автоматики объектов малой генерации.

Литература

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
2. **Беляев А.В.** Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (Часть 1). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. 84 с.: ил. [Библиотечка электротехника — приложение к журналу «Энергетик». Вып. 6 (138)].

МОНИТОРИНГ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КАК МЕТОД ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ

В связи с переходом к рыночной экономике потребительский рынок переполнен дешевой низкокачественной продукцией. Поэтому в настоящее время все чаще наблюдается тщательный поиск и выбор потребителем качественных товаров с приемлемой ценой. Чтобы предприятие выпускало продукт на желаемом для покупателя уровне, руководитель должен рассмотреть модернизацию и снижение себестоимости производства продукции.

В нашей стране известно высокое и неоправданное потребление промышленными предприятиями электроэнергии. Для эффективного использования оборудования и уменьшения потерь необходимо внедрение мер по энергосбережению. Чтобы предпринять то или иное действие, направленное на снижение затрат энергоресурсов, нужна техническая система, которая может предоставить понимание настоящего уровня потребления, а после определить эффективность проведенных мероприятий. Мониторинг потребления электроэнергии позволяет получить «полную картину» электропотребления на промышленном предприятии. Результатом применения такой системы являются рациональное использование электрической энергии и сэкономленные денежные средства, которые можно направить на улучшение рабочей среды, модернизацию и замену устаревшего оборудования, что приводит к заметному повышению качества и уменьшению себестоимости выпускаемой продукции.

Также система мониторинга потребления электроэнергии позволяет получить данные о ее качестве. Так, плохое качество электроэнергии часто приводит к электромагнитному и технологическому ущербу [1]. Технологический ущерб приводит к браку продукции и ухудшению качества, электромагнитный — к частичному или полному выводу из строя промышленного оборудования, которое играет важную роль в производственном процессе. Поломка является причиной частой порчи товаров, а также остановки производства того или иного вида изделия. Дабы не допустить этого, важно иметь четкую достоверную информацию о качестве и потреблении электроэнергии для принятия своевременных и соответствующих действий и верных решений.

Литература

1. **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009.

А.Д. Куликов, студ.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

Концепция распределенной генерации подразумевает строительство дополнительных источников электроэнергии в непосредственной близости от потребителей. Мощность таких источников выбирается исходя из ожидаемой мощности потребителя с учетом имеющихся ограничений. При этом потребитель не отключается от общей сети электроснабжения. Благодаря расположению когенерационных установок непосредственно у потребителей становится возможным использование не только вырабатываемой электроэнергии, но и тепловой энергии на нужды отопления, горячего водоснабжения или абсорбционного холодоснабжения самого владельца КГУ или сторонних потребителей, расположенных поблизости. Это позволяет добиться высокой эффективности использования топлива (до 90 % потенциальной энергии) [1].

Существующие в сетях 6—35 кВ системы РЗиА обычно построены с использованием принципа одностороннего питания распределительной сети низкого напряжения. При наличии распределенных источников в сети возникает многостороннее питание, что приводит к изменению требуемый принципов релейной защиты и автоматики [1].

Источники малой генерации выполняются на базе относительно маломощных синхронных генераторов или транзисторных инверторов. Характерной особенностью указанных источников является малая инерционность и соответственно малый запас динамической устойчивости при коротком замыкании.

В докладе приводятся варианты повышения быстродействия РЗиА, которые обеспечивают не только повышение устойчивости, но и уменьшение стоимости первичного высоковольтного оборудования (выключатели, силовые кабели, конструкции трансформаторных подстанций и т.п.)

Повышение быстродействия снижает длительность провалов и устойчивость нагрузки. Широкому внедрению распределенной генерации препятствуют отсутствие развитых организационно-правовых и институциональных форм работы с распределенной генерацией на оптовом и розничном рынках [2].

Литература

1. **Опадчий Ф.Ю.** Распределенная генерация за рубежом и в ЕЭС России http://www.np-ace.ru/media/presentations_documents/3_Опадчий_ФЮ.pdf
2. **Арцишевский Я.Л., Вострокнутов С.А.** Повышение быстродействия релейной защиты и автоматики в электрической сети 6—35 кВ мегаполиса // Энергетик. 2011. № 5.

*Ф.К. Логинов, студ.; рук-ли С.И. Хренов, к.т.н., доц.;
Д.А. Матвеев, ст. преп. (НИУ «МЭИ»)*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ СОПОСТАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ

В настоящее время в отечественных распределительных сетях 6—35 кВ получили распространение пять режимов заземления нейтрали: изолированная, заземленная через дугогасящий реактор (ДГР), высокоомный или низкоомный резистор или через комбинацию ДГР и резистора. Каждый из этих режимов имеет достоинства и недостатки, зависящие от конфигурации сети и состава оборудования. Однако нормативного документа, регламентирующего выбор режима нейтрали на сегодняшний день нет, так как отсутствуют работы по технико-экономическому обоснованию и сопоставлению различных технических решений. Помимо этого, для режима заземления нейтрали через ДГР отсутствуют как нормативные технические требования к реакторам, так и критерии выбора ДГР различных конструкций: плунжерных, управляемых подмагничиванием, с емкостным регулированием.

Проблема оценки и сопоставления эффективности применения ДГР различных конструкций комплексная. ДГР не должны способствовать повышению аварийности в нормальном (безаварийном) режиме работы сети, обеспечивать быстрое гашение дуги однофазного замыкания на землю и минимальный уровень перенапряжений при перемежающемся характере дуговых замыканий. Помимо этого, требует решения задача быстрого и надежного селективного определения поврежденного присоединения.

В настоящем докладе представлены результаты исследований, выполненных с целью определения критерия сопоставления эффективности ДГР различных конструкций. На основании измерений, проведенных на экспериментально-испытательном стенде ОАО «РЭТЗ Энергия», показано, что быстродействие ДГР всех конструкций вопреки установившимся представлениям в значительной степени определяется аperiodической составляющей тока реактора [1], которая влияет на энергию, выделяющуюся в канале дугового замыкания при перемежающемся характере разряда. Предложен критерий сопоставления эффективности работы реакторов по средней энергии, выделяемой в месте однофазного замыкания на землю.

Литература

1. Матвеев Д.А., Хренов С.И. Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ: теоретические аспекты // Электричество. 2015. № 1.

Э.М. Лэма, студ.; рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СЕТИ 230 кВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЭКВАДОРА

В последнее десятилетие возросла актуальность объединения латиноамериканских электросетей, которое будет способствовать энергетической эффективности из-за смещения максимумов нагрузки особенно в странах Андского региона [1].

Постоянный рост спроса на электроэнергию в Эквадоре определил необходимость включения в национальную систему новых источников генерации электрической энергии путем установки новых мощностей генерации на местном уровне, а также ввод в эксплуатацию взаимосвязей с соседними странами, которые, кроме оказания важного вклада в обеспечение спроса, способствуют улучшению условий эксплуатации системы [2].

Но для правильной работы, управления и обслуживания этих единых систем требуются более надежные системы релейной защиты и автоматики, которые отвечают гораздо более жестким требованиям быстродействия, селективности, чувствительности и надежности [3].

В Эквадоре с начала 70-х годов работает единая кольцевая сеть 230 кВ [4]. А теперь планируется энергетический коридор 500 кВ для указанных выше целей.

В работе анализируется взаимосвязанная работа релейной защиты и автоматики в кольце 230 кВ с использованием высокочастотной связи по высокочастотным проводам линии, комплексы дистанционной и топографической среды определения места повреждений и их влияние на параллельную работу электростанций и надежность электропередачи.

Литература

1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.olade.org/>
2. [Электронный ресурс]. URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/568/1/CD-1080.pdf>
3. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. 1984.
4. [Электронный ресурс]. URL: <http://repositorio.uasb.edu.ec>

*Р.С. Максимов, Д.М. Ибрагимова, студенты;
рук. Я.Л. Арцишевский, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ

Необходимость знания своего прошлого, безусловно, важна в нашей жизни, прежде всего потому, что именно прошлое позволяет трезво оценить пути развития будущего. Энергетика — отрасль промышленности, которая тоже находится в непрерывном совершенствовании, однако вследствие своей фундаментальности развивается весьма неспешно.

С.А. Лебедев известен миру как выдающийся конструктор вычислительной техники и специалист в области автоматики электрических сетей. Будучи студентом, Сергей Алексеевич в дипломном проекте разрабатывал проблему устойчивости электроэнергетических систем. Совместно с П.С. Ждановым он публикует в 1933 г. монографию [1]. Кроме деятельности в области энергетики С.А. Лебедев был заинтересован в развитии вычислительных машин. Именно ему принадлежит создание первой ЭВМ в СССР — МЭСМ, а также БЭСМ-6 и другие. Они являлись элементной базой для автоматизации энергосистем. С.А. Лебедев является основателем кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем». На сегодняшний день активно разрабатывается ТП «Интеллектуальная энергетическая система России». Также стоит отметить активное использование программно-аппаратного комплекса (ПАК) RTDS (RealTimeDigitalSimulator), на котором проводятся исследования нормальных и аварийных режимов энергосистем с функционированием в режиме реального времени виртуального силового оборудования, реальных промышленных устройств РЗА. Студенты нашей кафедры чувствуют уверенность в том, что они могут глубже вникать, изучать различные процессы и устройства РЗА, потому что на нашей кафедре есть ПАК RTDS и другое ПО. Именно разработки С.А. Лебедева в области вычислительной техники, устойчивости и автоматизации энергосистем дали толчок развитию энергетики. Для более отчетливого понимания работы релейной защиты необходимо изучить труды Лебедева Сергея Алексеевича, провести анализ существующих систем защиты энергосистем, а также ознакомиться с новыми разработками в этой области.

Литература

1. **Жданов П.С., Лебедев С.А.** Устойчивость параллельной работы электрических систем. М.-Л.: Энергоиздат, 1933. 263 с.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ НАВЕДЕННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

При решении задач координации и проектирования изоляции, выборе средств защиты от перенапряжений обмоток силовых трансформаторов важным вопросом является определение переходных наведенных перенапряжений, возникающих на вторичных обмотках при воздействии переходных напряжений на первичную обмотку трансформатора.

Целью работы является развитие методов моделирования силовых трансформаторов в диапазоне высоких частот для расчета наведенных перенапряжений в обмотках, носящих резонансный характер.

В настоящее время моделирование силовых трансформаторов для указанных целей проводится путем реализации моделей «черного ящика» (black-box model) и «белого ящика» (white-box model) [1].

Для создания моделей «черного ящика» требуется наличие измеренных частотных характеристик и передаточных функций обмоток. В данной работе рассмотрены и проанализированы передовые методики и подходы [2, 3], позволяющие по измеренным частотным характеристикам обмоток получить передаточные функции и создать модель «черного ящика».

В докладе представлены результаты измерений частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов методом частотного анализа реакции (ЧАР), широко используемым на практике для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов.

Для полученных передаточных функций обмоток представлены результаты расчетов наведенных напряжений на вторичных обмотках для характерных форм воздействующего напряжения, которые могут возникать в эксплуатации, и сделано сравнение формы и амплитуд наведенных напряжений.

Литература

1. CIGRE Brochure 577A. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System — Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39. (CIGRE, April 2014). 176 p. ISBN: 978-2-85873272-2.

2. **Wideband** Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment / A. Holdyk, B. Gustavsen, I. Arana, J. Holboell. // IEEE Transactions on power delivery. June 2014. Vol. 29. No. 3.

3. **Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, Ivo Uglešić.** High-Frequency Model of the Power Transformer Based on Frequency-Response Measurements // IEEE Transactions on power delivery. February 2015. Vol. 30. No. 1.

*Т. В. Петешева, студ.; рук. Я. Л. Арцишевский, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ»)*

КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЙ СЕТИ 110 КВ

В электрических сетях используется большое количество устройств релейной защиты и средств автоматики, включая средства определения мест повреждений (ОМП). В межгосударственной сети наиболее остро встает вопрос ориентации относительно государственных границ. Наличие ответвлений на линиях еще больше усложняет данную задачу [1]. Для решения этих проблем автор предлагает интегрировать топографические и дистанционные средства ОМП.

Комплексный интегрированный с сетями связи подход к данной проблеме не имеет широкого распространения в электрических сетях Российской Федерации, поэтому при поддержке фирм-производителей возможно проверить эффективность предложенного решения [2].

Еще одним способом решения вопросов являются внедрение двухуровневого комплекса ОМП и согласование показаний всех устройств на автоматизированном рабочем месте диспетчера. Благодаря этому согласованию обеспечивается сокращение времени аварийного простоя линии и соответствующее повышение коэффициента готовности и надежности электроснабжения [3].

Литература

1. **Арцишевский Я.Л.** Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью. М., 1988.
2. <http://antrax-energo.ru/>
3. **Правила** устройства электроустановок. — 7-е изд. М.: Энергосервис, 2003.

*Д.Р. Рахимов, Е.В. Швецова, студенты;
рук. И.С. Козьмина, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Конструкции с бумажно-масляной конденсаторной изоляцией (БМКИ) широко распространены в наше время. В основном они разрабатываются для обеспечения больших емкостей при промышленном применении в цепях переменного тока, выдерживая большие токи и высокие пиковые напряжения частотой (50 Гц), особенно в сетях высокого напряжения и, вероятнее всего, еще будут использоваться долгое время.

Конструкции с БМКИ сейчас в основном применяют для работы с высоким напряжением. Но при этом в данных электрических устройствах присутствуют сильные краевые эффекты. Критическое допустимое напряжение конкретной конструкции зависит от толщины обкладки, остроты края, рода и толщины диэлектрика, в противном случае это может привести к электрическому пробое изоляции.

В процессе проведенных расчетов были исследованы с помощью современной программы ELCUT края различных типов обкладок с бумажно-масляной конденсаторной изоляцией. Были рассмотрены края обкладок раструбом, мелкоступенчатая и грубоступенчатая бумажно-масляные конденсаторные изоляции, с разделением посредством конденсаторных обкладок толстого изоляционного слоя на несколько более тонких слоев и с подвернутым краем БМИ. Кроме моделирования с использованием программы ELCUT, было проведено физическое моделирование на проводящей бумаге, что полностью подтвердило расчетные данные [1].

В ходе работы были построены и проанализированы математические модели для расчета распределения поля возле обкладки с подвернутым краем изоляции и с изолированными проводниками. Из проведенных расчетов выяснили, что наиболее эффективным способом минимизации краевого эффекта является использование конструкции с изолированными проводниками между обкладками. Данная конструкция позволяет сконцентрировать электрическое поле непосредственно между электродами нашего электрического устройства. Но чтобы создать такие устройства, нужно пройти сложный технологический процесс, а он является дорогостоящим.

Литература

1. Козьмина И.С., Чайкин В.С., Матекова Г.Д. Использование измерений напряженности электрического поля для контроля качества изоляции электрооборудования // Известия КГТУ. 2013. № 30.

*И.Н. Румянцев, М.А. Сеченов, студенты;
рук-ли В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.; А.В. Куванов, асс. (ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ КУРСОВ И ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ

Для изучения курсов «Релейная защита и автоматика» весомую роль играют практические занятия. В связи с высоким развитием вычислительной техники весьма эффективно практикум может выполняться и выполняться с применением программно-компьютерного обеспечения. Однако значимую роль в освоении курсов играет и физический эксперимент, который важен не только для образования, но и для проведения научных исследований.

В настоящее время существует богатый выбор оборудования для учебно-научного эксперимента по релейной защите и автоматике. Безусловно, лидерами в этом являются программно-аппаратные комплексы реального времени, такие как RTDS (Real Time Digital Power System Simulator), либо оборудование для системы Opal RT. Однако это дорогое оборудование, что ограничивает его широкое внедрение в учебно-исследовательскую практику.

Для учебного эксперимента широкое распространение получили учебные стенды. Так, в ИГЭУ, на кафедре автоматического управления электроэнергетическими системами, внедрены в учебный процесс стенды, выпущенные компанией «Учебная техника» (г. Челябинск). На данных стендах физическая реализация первичного электросетевого оборудования выполнена в трехфазном исполнении, а функции управления и защиты реализованы на программно-инструментальном уровне с помощью плат ввода-вывода фирмы National Instruments, интегрированных в компьютеры.

Для полноценного изучения работы современных устройств РЗА авторами было решено расширить функциональные возможности стендов, интегрировав в них терминалы современных микропроцессорных защит.

Однако уровни первичных и вторичных токов и напряжений стенда не подходят для прямого подключения микропроцессорных терминалов РЗА. Так, уровни номинальных токов $0,01 \div 0,1$ А, а фазные напряжения — 220 В, в то время как номинальные токи терминалов 1(5) А, а напряжений — 100 В ($100/\sqrt{3}$ В). Для согласования указанного оборудования по токам и напряжениям было решено оборудовать стенды дополнительными согласующими трансформаторами тока и напряжения. Авторами выполнено исследование влияния промежуточных измерительных трансформаторов как на изменение параметров моделируемых первичных цепей, так и на искажения измеряемых токов и напряжений.

Н.В. Свистунов, студ.; рук. Т.Г. Климова, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ УСТРОЙСТВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В отечественных сетях все большее распространение получают системы мониторинга переходных режимов (СМПР), основным оборудованием которых являются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) [1]. УСВИ позволяют получать синхронизированные по времени данные о параметрах режима энергосистемы с высокой точностью, которые по качеству превосходят данные от традиционных устройств телеметрии.

Преимущества использования СМПР на основе УСВИ: 1) получение значений тока, напряжения, частоты, фазового угла, значения активной и реактивной мощностей для каждой фазы; 2) высокая точность получаемых данных; 3) синхронизация данных по времени с помощью GPS/ГЛОНАСС; 4) расчет скоростей изменения величин; 5) использование различных современных протоколов передачи данных.

Применение в релейной защите: 1) повышение чувствительности защит с относительной селективностью посредством более точной настройки [2]; 2) локализация места повреждения на удаленных объектах; 3) понижение выдержек времени ступеней смежных защит, осуществляющих дальнейшее резервирование, при неустранении повреждения.

Основные проблемы, ограничивающие использование данных, полученных от УСВИ, в релейной защите: 1) малые диапазоны рабочих значений токов (от 10 до 200 % номинального) и напряжений (от 80 до 120 % номинального), при которых обеспечивается точность получаемых данных; 2) невозможность получения точных данных от УСВИ при близких КЗ; 3) отсутствие отечественной редакции стандарта, регламентирующего требования, предъявляемые к УСВИ; 4) отсутствие стандарта, регламентирующего взаимодействие устройств релейной защиты с УСВИ.

СМПР позволяют создать интеллектуальный комплекс выявления, локализации и ликвидации повреждения посредством взаимодействия с релейной защитой и автоматикой в режиме реального времени. Подобные решения ускорят процесс создания адаптивных устройств защиты и автоматизации энергосистем.

Литература

1. **Тельгаев И.А.** Создание системы синхронизированных векторных измерений в интеллектуальных кластерах ОЭС Востока. СИГРЭ. 2013.
2. **Небера А.А.** Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима. СИГРЭ. 2011.

*Т.Е. Шадриков, асп.; А.Д. Бачурина, студ.;
рук-ли А.В. Гусенков, к.т.н., доц.; А.М. Соколов, д.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Развитие отрасли силовой электроники и ужесточающиеся требования к сокращению потерь электроэнергии сделали возможными появление нового направления в области создания и применения высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты [1, 2].

Одним из эффективных способов организации электроснабжения промышленных предприятий, потребителей в отраслях дерево- и металлообработки и производстве строительных элементов является создание разветвленной и гибкой сети электропередачи с отдельными рабочими постами напряжения промышленной частоты. Однако часть современного производственного оборудования требует наличия напряжения с частотой, отличной от промышленной. Пути решения задачи электроснабжения таких потребителей сводятся к применению варианта сети промышленной частоты с установкой преобразователей частоты на каждой точке присоединения специального оборудования, либо организации сети электроснабжения с применением напряжения повышенной частоты. Второй вариант является наиболее экономически эффективным, так как позволяет сократить потери в распределительных сетях предприятия, повысить гибкость управления технологическим процессом предприятия. При наличии многих источников потребления в сети актуальной становится задача построения распределенной высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты. Для решения указанной задачи разработана математическая модель высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты разветвленной конструкции с питанием от источника повышенной частоты с несинусоидальной формой выходного напряжения. В работе модели применена методика частотного анализа и преобразования Фурье.

Моделирование поможет исследовать переходные и установившиеся процессы в таких электрических сетях повышенной частоты.

Литература

1. **Принципы** организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др. // Энергетик. 2014. № 3. С. 46—49.
2. **Принципы** организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др. // Энергетик. 2014. № 4. С. 15—18.

*Т.Е. Шадриков, асп., А.А. Дьячков, студ.;
рук-ли А.В. Гусенков, к.т.н., доц.; А.М. Соколов, д.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Согласно литературным источникам [1] перед современной энергетической отраслью стоит проблема развития и модернизации существующих технических решений, часть из которых используется исторически. Некоторые решения (например, частота 50 Гц) не вполне отвечают современным требованиям производства и промышленности. Очевидно, необходимо вести разработку новых методов, технических решений и принципов организации современной энергетики.

Одним из таких решений являются создание и применение высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты. Для исследования процессов, протекающих в сети электроснабжения промышленных потребителей, содержащих высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, была разработана математическая модель в среде MatLab. Модель является достаточно гибкой и учитывает количество кабельных линий, подключенных к источнику повышенной частоты (разветвленность сети), длину кабельной линии, рабочее напряжение и форму кривой напряжения источника питания. В модели использован принцип частотного анализа для разложения формы напряжения источника трапецидальной формы по гармоникам, воздействующего на активные и реактивные элементы схемы замещения. Для оценки динамической устойчивости при выборе оборудования, расчета аварийных переходных и установившихся режимов было выполнено испытание модели при работе с коротким замыканием. Варианты расположения КЗ варьировались от короткого замыкания на конце кабельной линии за понижающим трансформатором (на нагрузке) и на конце кабельной линии на стороне высокого напряжения понижающего трансформатора повышенной частоты.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости создания и исследования теории релейной защиты и противоаварийной автоматики для высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты и сетей, в составе которых они применяются.

Литература

1. **Принципы** организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев и др.// Энергетик. 2014. № 3. С. 46—49.

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ — ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА	3
Секция 38. Атомные электрические станции и установки	5
Секция 39. Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии	34
Секция 40. Теплофизика	47
Секция 41. Техника и физика низких температур	65
Секция 42. Нанотехнологии.....	77
НАПРАВЛЕНИЕ — ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	83
Секция 43. Котельные установки и охрана окружающей среды	85
Секция 44. Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС.....	113
Секция 45. Схемы и режимы работы тепловых электрических станций	146
Секция 46. Контроль, автоматизация и управление в энергетике	170
НАПРАВЛЕНИЕ — ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ	193
Секция 47. Энергетические установки и двигатели	195
Секция 48. Проблемы технологии, надежности и конструирования.....	225
Секция 49. Робототехнические и мехатронные системы.....	241
НАПРАВЛЕНИЕ — ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	251
Секция 50. Электроэнергетические системы	253
Секция 51. Электроснабжение.....	281
Секция 52. Электрические станции	296
Секция 53. Возобновляемые источники энергии.....	313
Секция 54. Электрофизика и системы управления электроэнергетических объектов	330

Научное издание

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

**Двадцать вторая Международная научно-техническая
конференция студентов и аспирантов**

Тезисы докладов
В 3 томах

Том 3

Корректор *Г.Ф. Раджабова*
Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета *М.Н. Маркиной*

Подписано в печать 29.01.16	Формат бумаги 60×84/16
Печать цифровая	Усл. п.л. 22,25

АО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14А