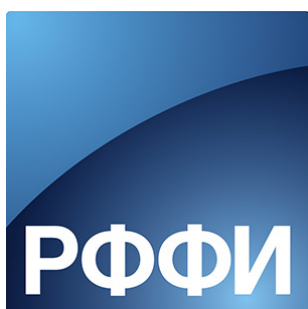


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



МАТЕРИАЛЫ

I МЕЖДУНАРОДНОГО  
МОЛОДЁЖНОГО ФОРУМА

«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ  
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»

ТОМ 1.

Томск – 2013

УДК 620.9(063)  
ББК 31л0  
И73

Интеллектуальные энергосистемы: труды I Международного молодёжного форума. В 2т. Томск 21-25 октября 2013г. Т.1.- Материалы I Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 321 с.

Настоящий сборник содержит материалы I Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», проведенного 21-25 октября 2013г. на базе Энергетического института Томского политехнического университета, при поддержке Российского национального комитета Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения и Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

Материал сборника представлен без редактирования авторских электронных версий.

#### **СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ СБОРНИКА ТРУДОВ ФОРУМА**

1. Сулайманов А.О. к.т.н., доцент, начальник научного отдела ЭНИН ТПУ, председатель
2. Гусев А.С. д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
3. Вайнштейн Р.А. д.т.н., доцент кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
4. Лавринович В.А. д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
5. Беляев Л.А. к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ
6. Заворин А.С. д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГСипГУ ЭНИН ТПУ
7. Кузнецов Г.В. д.ф-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ
8. Лукутин Б.В. д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭПП ЭНИН ТПУ
9. Озерова И.П. к.т.н., доцент, зав. кафедрой АТП ЭНИН ТПУ
10. Муравлев О.П. д.т.н., профессор кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ
11. Сивков А.А. д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ

Верстка и дизайн оригинал макета: Зимина Н.А.

© Томский политехнический университет, 2013

**ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ РНК СИГРЭ,  
ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ПРАВЛЕНИЯ ОАО «СО ЕЭС»  
АЮЕВА БОРИСА ИЛЬИЧА**

Российская электроэнергетика, темпы и масштабы преобразований диктуют условия, при которых единственно возможен переход на качественно новый её уровень. Одно из самых главных в этом процессе – специалисты, обладающие такими знаниями и профессиональными компетенциями, которые позволят отрасли перейти совершенно другое качество.

Мы предпринимаем для этого достаточные усилия и делаем это с разных направлений, обуславливая необходимый конечный результат. По этой причине в моем поле зрения как Председателя Правления ОАО «СО ЕЭС» и Председателя РНК СИГРЭ постоянно находятся такие вопросы, как качество подготовки специалистов, поддержка отраслевой и вузовской науки, развитие научно-исследовательских компетенций, участие в воспитании и подготовке нового поколения российских электроэнергетиков.

Все прекрасно понимают, что сегодня мы как никогда остро нуждаемся в молодых продвинутых исследователях, которые не только способны выполнить работу технолога или конструктора и т.д., но в инновационно-технической сфере свободно конкурировать с менеджерами крупнейших компаний, действующих в области генерации, распределения и потребления, задающих тон в области технологической политики в мире.

Со своей стороны и при поддержке ведущих электроэнергетических компаний в рамках Молодежной секции РНК СИГРЭ мы регулярно организовываем и проводим мероприятия, которые призваны мобилизовать и активизировать молодых, чей талант может послужить отрасли. В этом ключе работает Энергетический институт Томского политехнического университета, с которым Молодежная секция



**Аюев Борис Ильич**  
Председатель РНК СИГРЭ,  
Председатель Правления  
ОАО «СО ЕЭС», д.т.н.

РНК СИГРЭ весьма эффективно сотрудничает с самого момента её создания.

И в данном случае мои слова подтверждаются тем фактом, что в Томском политехническом университете был организован и впервые состоялся международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы». Форум стал местом концентрации талантов, в числе которых оказались не только студенты, бакалавры, магистранты, обучающиеся по электроэнергетическим специальностям, или аспиранты и молодые ученые, но и школьники. Многие из них впервые получили возможность проявить свои способности и знания в перспективных областях развития электроэнергетики.

Хочу поблагодарить руководство ТПУ, участников и организаторов Форума за проделанную работу. И надеюсь, что Томск, ТПУ, Энергетический институт ТПУ, ещё не раз закрепят за собой авторство в подобных общественно-значимых проектах и инициативах.

С уважением,  
Председатель Правления ОАО «СО ЕЭС»,  
Председатель РНК СИГРЭ, д.т.н. Б.И. Аюев



**ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ ПРОРЕКТОРА-ДИРЕКТОРА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
БОРОВИКОВА ЮРИЯ СЕРГЕЕВИЧА**

Кадровый потенциал отрасли и развитие энергетики России – величины взаимообусловленные. Одно невозможно без другого, в этом смысле тот набор инструментов, который предлагает молодёжная секция Российского национального комитета СИГРЭ (МС СИГРЭ) – конкурс докладов, олимпиады и многое другое – это реальная возможность талантливым студентам и их наставникам заявить о себе.

Не случайно Национальный исследовательский Томский политехнический университет является полноценным участником МС СИГРЭ, с которой мы начали сотрудничать с первых дней. Что касается тактики взаимодействия, то она успешна и приносит свои плоды.

Так на сегодня в рамках начавшейся работы Энергетический институт ТПУ и Сколковский институт науки и технологий (Сколтех) реализуют один из проектов. Также есть задачи, которые мы решаем самостоятельно.

Актив СИГРЭ в ЭНИН ТПУ составляет ни много ни мало 227 студентов, магистрантов, аспирантов, молодых учёных, а также 8 профессоров и преподавателей. В числе первых – те, кто непосредственно участвует в конкурсах выпускных квалификационных работ, рефератов, исследований по электроэнергетической, электротехнической тематикам, и, как правило, занимает призовые места. Их старшие коллеги обеспечивает поддержку конкурсных мероприятий СИГРЭ.

С другой стороны, мы выстраиваем «кадровый вектор» совместно с Открытым акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (ОАО «СО ЕЭС»). Эту



**Боровиков Юрий Сергеевич**  
Проректор-директор  
Энергетического института  
Томского политехнического  
университета

работу мы начали в 2008 году, и сегодня она реализована в двух целевых магистерских программах – «Управление режимами электроэнергетических систем» и «Автоматизированные системы диспетчерского управления электроэнергетических систем». Заказчиком на обе программы является ОАО «СО ЕЭС».

Мы прекрасно понимаем, что максимального результата в этом направлении можно достичь только совместными усилиями: ведущие компании отрасли, ряд региональных энергокомпаний; пул ведущих и профильных университетов; крупные научно-исследовательские и проектно-изыскательские институты электроэнергетики и электротехники. Только так, на мой взгляд, можно двигаться вперёд.

В качестве одной из итераций этого движения Энергетический институт ТПУ при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований организовал I-ый Международный молодежный форум «Интеллектуальные системы». И мы полагаем, что участники – а это все ступени обучения, включая предуниверсарий – смогут показать творческий и интеллектуальный потенциал, расширить научный кругозор и сделать осознанный выбор в сфере научно-исследовательской деятельности как основной и профилирующей.

Искренне благодарю руководителей ОАО «СО ЕЭС», МС СИГРЭ, РНК СИГРЭ за постоянную работу с молодёжью, формирование отраслевой молодёжной политики и вклад в развитие кадрового потенциала российской электроэнергетики.

Проректор-директор ЭНИН ТПУ,  
доцент, к.т.н. Ю.С. Боровиков

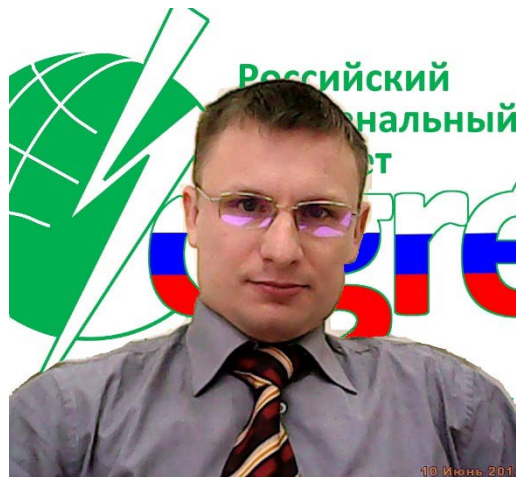
## ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ РУКОВОДИТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА МОЛОДЕЖНОЙ СЕКЦИИ РНК СИГРЭ ГОФМАНА АНДРЕЯ ВЛАДИМИРОВИЧА

Все время существования CIGRE («Conseil International des Grands Réseaux Electriques» - Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения) вопросу выращивания молодых специалистов и ученых уделялось значительное внимание. Здесь можно выделить усилия по привлечению молодежи к работе в исследовательских группах CIGRE, соавторство молодых ученых с маститыми учеными в написании статей, сниженный вдвое размер ежегодного членского взноса для молодых специалистов и ученых в возрасте до 35 лет.

С июня 2012 года в РНК СИГРЭ работает Молодежная секция, созданная по инициативе Почетного Председателя РНК СИГРЭ Дьякова А.Ф. и под руководством Председателя РНК СИГРЭ Аюева Б.И., участниками которой являются студенты, бакалавры и магистранты российских технических вузов, обучающиеся по электроэнергетическим специальностям, а также аспиранты и молодые ученые.

Основной целью Молодежной секции РНК СИГРЭ является воспитание и подготовка нового поколения российских энергетиков – молодых ученых, технологов, конструкторов, менеджеров, обладающих международной конкурентоспособностью, способных осуществить технологический инновационный прорыв в российской электроэнергетике. Создание Молодежной секции также преследует цель формирования стимулов для потенциальных работодателей инвестировать средства в человеческий капитал, формировать кадровый резерв за счет выпускников российских технических вузов, участвовать в развитии талантов, профессионального мастерства, творческого и инновационного потенциала современной молодежи.

В рамках Молодежной секции РНК СИГРЭ, при поддержке ведущих электроэнергетических компаний, на регулярной ежегодной основе в российских технических вузах проводятся конкурсы студенческих научно-технических работ (рефератов, докладов, переводов,



**Гофман Андрей Владимирович**  
Руководитель Оргкомитета  
Молодежной секции РНК СИГРЭ

др.), олимпиады, викторины, конференции, иные интересные и познавательные мероприятия, нацеленные на выявление, поддержку, продвижение образовательной активности молодежи и ее достижений в профессиональном обучении, научно-техническом развитии и творчестве.

Сборник докладов, представляемый вниманию читателя, подготовлен по итогам одного из таких мероприятий - Первого международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы» в Томском политехническом университете.

Форум предоставил талантливой молодежи возможность проявить свои способности и знания в перспективных областях развития электроэнергетики. Очень важным является то, что форум для некоторых из них стал первым шагом в сообщество профессионалов электроэнергетики, сделанным ими вместе с Молодежной секцией РНК СИГРЭ. Желаю молодежи, избравшей для себя профессиональный путь в электроэнергетику, достижения успехов в научных исследованиях и трудовой деятельности!

Отдельную благодарность выражаю руководству и профессорско-преподавательскому составу Томского политехнического университета, благодаря усилиям которого стало возможным проведение форума и издание данного сборника.

# 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧАЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Ю.П. Загайнова

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ32

Хакасская энергосистема (ЭС) является ключевой по выдаче мощности с Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) и компенсации пика нагрузок на всей территории Сибирского федерального округа. Кроме того, СШГЭС является одним из самых мощных источников в Единой энергосистеме России, покрывающим сезонные и суточные колебания электрической энергии (мощности), обеспечивая потребителей Хакасской ЭС электрической энергией по воздушной линии (ВЛ) 500кВ СШГЭС – ПС Означенное, а западных дефицитных ЭС, входящих в Объединенную энергосистему Сибири, – по ВЛ 500кВ СШГЭС – ПС Новокузнецкая [1].

Следует отметить, что одними из самых перспективных целей развития Хакасской ЭС на период до 2020 года являются завершение работ по восстановлению и реконструкции СШГЭС (декабрь 2014 года, с этого времени установленная мощность станции должна составить 6400МВт) и, как следствие, снятие ограничений по выдаче мощности от шин СШГЭС, так как в настоящее время выдача мощности ограничена в силу малой пропускной способности ВЛ 500кВ СШГЭС – ПС Новокузнецкая и СШГЭС – ПС Означенное. Ограничения вводятся по условию сохранения динамической устойчивости (ДУ) генераторов ГЭС, поэтому вопрос анализа эффективности управляющего воздействия (УВ) для сохранения ДУ при нормативных возмущениях, обозначенных в [2], является актуальным.

Самым распространенным видом УВ, применяемым на ГЭС, является отключение генераторов (ОГ) из-за высокой маневренности гидроагрегатов, определяемой широким диапазоном изменения его мощности и малым временем пуска. ОГ оказывает воздействие на условия ДУ, осуществляется отключением генераторных или блочных выключателей с минимально возможным запаздыванием относительно момента возникновения аварийного возмущения [3]. Негативные

последствия ОГ заключаются в возникновении повышенных нагрузок на подпятник и обмотку возбуждения генератора, поэтому ресурс по числу включений и отключений у гидрогенераторов ограничен [4].

Количество отключаемых генераторов, необходимое для обеспечения ДУ, определяется с помощью расчетов электромеханических переходных процессов в соответствии с режимом системы, тяжестью возмущения и условием обеспечения ДУ.

На рис. 1 показано расположение угловых характеристик мощности генератора и турбины для нормального, аварийного и послеаварийного режимов при ОГ.

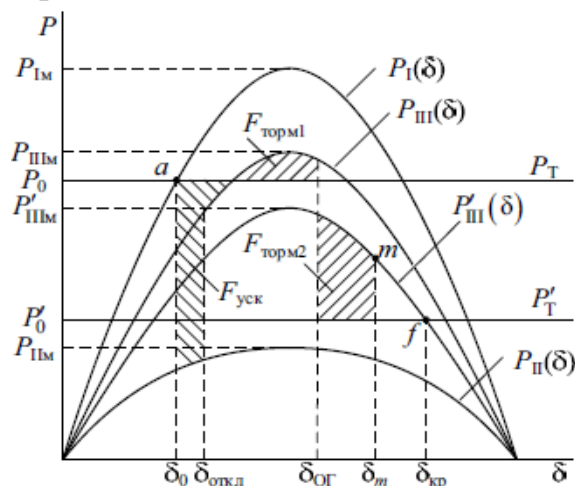


Рис. 1. Угловые характеристики мощности генератора и турбины при ОГ

После короткого замыкания (КЗ) возникает небаланс между механической мощностью турбины и электрической мощностью генератора, вследствие чего ротор генератора ускоряется. Применение ОГ снижает мощность турбины с величины  $P_T$  до  $P'_T$ , уменьшая небаланс мощности. За счет этого увеличивается площадка торможения, а при быстром отключении уменьшается и площадка ускорения, что позволяет сохранить ДУ.

Для предотвращения нарушения устойчивости определяют количество отключаемых генераторов и производят их отключение, исходя из наиболее вероятного сценария развития аварии. Далее анализируют ситуацию, в случае необходимости осуществляя дополнительное ОГ.

Для проведения анализа влияния количества отключаемых генераторов на обеспечение ДУ в программном комплексе RUSTab была смоделирована схема Хакасской ЭС, и рассмотрено наиболее тяжелое нормативное возмущение группы III [2].

В результате расчета были получены зависимости, изображенные на рис. 2.

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается до 480 МВт, далее происходят ее колебания в широких пределах; угол ротора генератора возрастает, и через 4,5 секунды от начала расчета происходит первый проворот генератора, далее на ротор начинает действовать увеличивающийся избыточный момент, обусловленный разностью мощностей турбины и генератора, что приводит к дальнейшему увеличению угла.

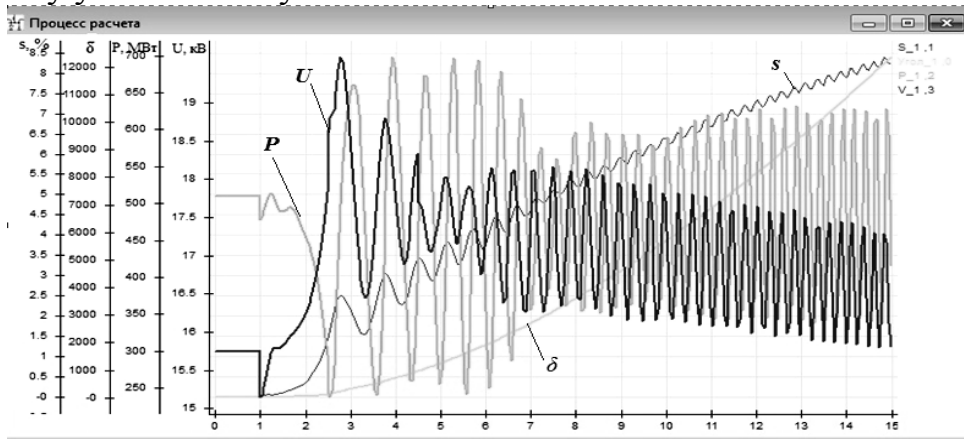


Рис. 2. Режим однофазного КЗ на линии СШГЭС – ПС Новокузнецкая, отключение одной цепи ВЛ действием УРОВ с отказом одного выключателя, неуспешное ОАПВ, рабочая мощность генераторов – 5100 МВт

При скорости ротора больше синхронной появляется скольжение  $s$ , растущее с увеличением разности угловых скоростей ротора и магнитного поля статора.

Для втягивания генераторов в синхронизм сразу после первого проворота, необходима разгрузка генераторов СШГЭС, обеспечиваемая ОГ (рис. 3).

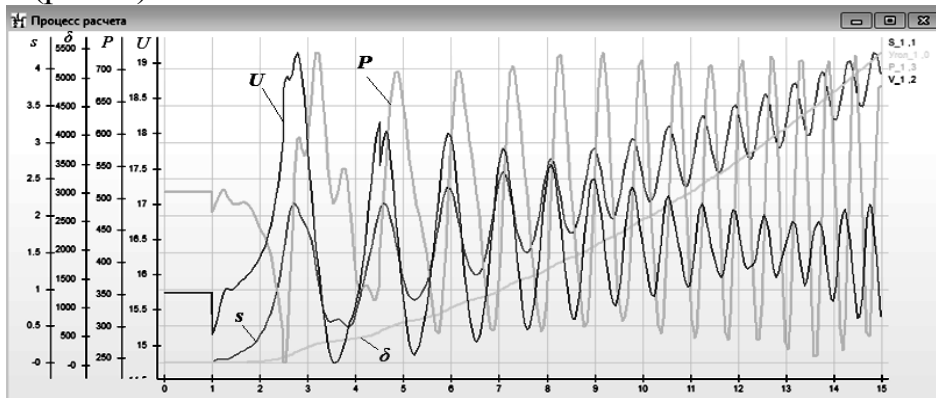


Рис. 3. Режим однофазного КЗ на линии СШГЭС – ПС Новокузнецкая, отключение одной цепи ВЛ действием УРОВ с отказом одного выключателя, успешное ОАПВ, ОГ – 2, рабочая мощность генераторов – 5100 МВт

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается, при скорости ротора больше синхронной появляется скольжение  $s$ . При срабатывании резервной защиты и отключении поврежденной цепи линии СШГЭС – ПС Новокузнецкая происходит наброс активной мощности, далее происходят колебания в широких пределах.

В момент времени, равный 4,5 секундам, происходит отключение генераторов № 3 и 4 СШГЭС, небаланс мощности уменьшается, амплитуда колебаний мощности уменьшается, но установившийся режим не достигнут, что свидетельствует о недостаточности количества отключаемых генераторов, поэтому требуется дополнительное ОГ (рис. 4).

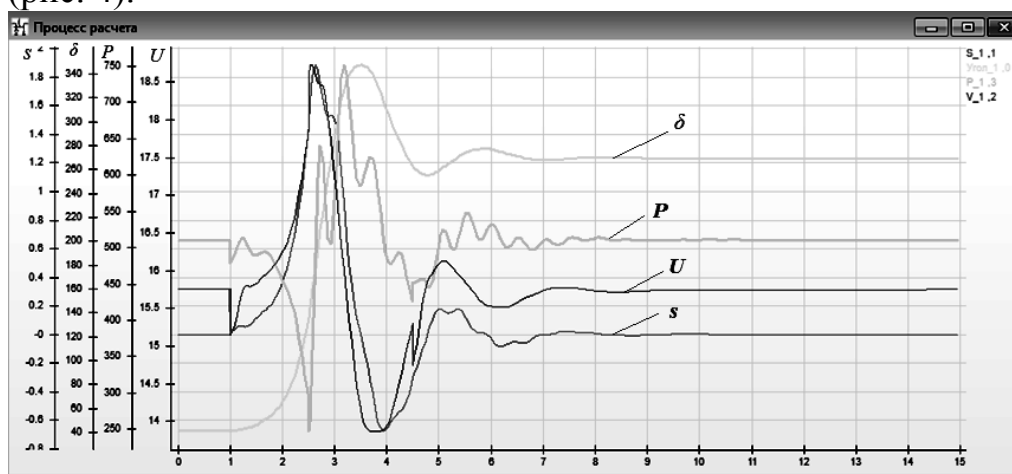


Рис. 4. Режим однофазного КЗ на линии СШГЭС – ПС Новокузнецкая, отключение одной цепи ВЛ действием УРОВ с отказом одного выключателя, успешное ОАПВ, ОГ – 4, рабочая мощность генераторов – 5100 МВт

В момент времени, равный 4,5 секунды, происходит отключение 4-х генераторов, амплитуда качаний уменьшается, и на 9-ой секунде от начала расчета переходный процесс фактически завершается, переход скольжения через нуль свидетельствует о сохранении ДУ, то есть отключение 4-х, а не 2-х генераторов обеспечит ДУ с учетом перспективы ввода генерирующих мощностей на СШГЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Энергетика Хакасии до и после аварии // Энергетика – 2010 – №32. – С 10-19.
2. Методические указания по устойчивости энергосистем: утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.– 21 с.



3. Гуревич Ю.Е. и др. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах./ Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990.– 390 с.
4. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемой для обеспечения устойчивости. – М.: Энергия, 1978.– 352 с.
5. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск.: Техноперспектива, 2008.– 375 с.

Научный руководитель: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

## **ПОИСК ОПАСНЫХ СЕЧЕНИЙ В СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ ТОМСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

А.П. Шубенкина  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ32

Опасное сечение (ОС) – это совокупность таких сетевых элементов, отключение которых приведет к полному разделению ЭС на две изолированные части [1].

Определение (ОС) и состава слабых связей, их формирующих, является актуальной задачей для специалистов проектных организаций и диспетчерских служб энергосистем (ЭС). Современные достижения в области вычислительной техники и программного обеспечения позволяют существенно автоматизировать процесс выявления ОС на этапе проектирования и обеспечить мониторинг ОС в процессе эксплуатации ЭС.

Набор актуальных ОС для каждого момента времени зависит от схемы и режима электрической сети, состояния устройств противоаварийной автоматики, объема управляющих воздействий и состояния устройств передачи аварийных сигналов.

В настоящее время выделяют три основные группы методов, использующихся для выявления ОС ЭС:

- метод, основанный на анализе параметров режима;
- метод, использующий для поиска ОС анализ матрицы Якоби;
- методы, формирующие ОС по слабым связям с наличием электрического центра качания (традиционный инженерный метод) и связанные с понятием точка минимального напряжения на линии электропередачи.

Метод, использующий для решения задачи поиска ОС анализ матрицы Якоби, наиболее распространен при выявлении ОС и последующем расчете максимально допустимых перетоков (МДП), заложен в основу многих программных комплексов (ПК), применяемых для расчета режимов ЭС. Критерием предельного режима является равенство нулю якобиана матрицы установившегося режима.

В основе реализации метода лежит непрерывное утяжеление режима с малыми изменениями координат. При этом получается полная имитация процесса нарушения апериодической устойчивости при заданной траектории утяжеления.

В случае определения ОС в сложной ЭС предполагается, что существует некоторая функциональная связь между вектором независимых  $Y$  и зависимых  $X$  параметров

$$Y = F(X), \quad (1)$$

где компонентами вектора  $Y = [y_1 \dots y_N]^T$  являются значения мощностей и модулей напряжений в узлах, а вектора  $X = [x_1 \dots x_N]^T$  – декартовы или полярные составляющие узловых напряжений, а также частота в ЭС, если ее изменение учитывается при расчетах режимов.

Разложив компоненты вектора  $F(X) = [f_1(X) \dots f_N(X)]^T$  в ряд Тейлора относительно точки  $X_0$  и отбросив нелинейные члены разложения, для малых изменений  $\Delta X$  получится приближенное соотношение, которое в матричной форме выглядит следующим образом:

$$\Delta Y = \frac{\partial F}{\partial X}(X_0) \cdot \Delta X, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial F}{\partial X}(X_0)$  – матрица Якоби от вектор-функции  $F(X)$ , вычисленная в точке  $X_0$ .

Если матрица Якоби не вырождена (якобиан отличен от нуля), то произвольным малым изменениям вектора  $\Delta Y$  отвечают некоторые изменения вектора  $\Delta X$ , которые приближенно могут быть найдены по формуле (2). Режим в точке  $X_0$  не может быть предельным, поскольку хоть малым, но произвольным изменениям вектора независимых переменных отвечают некоторые значения зависимых переменных. Предельным режимам могут отвечать только точки, в которых якобиан равен нулю (матрица Якоби становится вырожденной) [2].

ПК RastrWin с модулем ТКЗ позволяет осуществить поиск ОС на основе решения матрицы Якоби. Алгоритм поиска состоит в получении для исходного режима электрической сети предельного режима в направлении вектора изменения режима (ВИР), расчете маркеров

ОС для линий основного наблюдаемого фрагмента схемы (ОНФ) и формировании из линий ОС. Полученное ОС анализируется на соответствие ОНФ и ВИР.

Для коррекции ВИР в ремонтных схемах на основных направлениях утяжеления задаются контролируемые сечения, которые соответствуют заданным ВИР. Соответствие заданного сечения и ВИР определяется по корректному разделению сечением дефицитной и избыточной частей ЭС. Для проверки эффективности задания ВИР перед началом поиска ОС для каждого ВИР производится топологический анализ по заданным сечениям. Если в текущей ремонтной схеме заданное сечение делит контролируемую часть схемы на число несинхронных частей более двух, то происходит коррекция ВИР. Он автоматически разбивается на несколько, каждый из которых утяжеляет определённый транзит сети.

Для выполнения процедуры поиска ОС следует задаться определенными условиями, например, для существующей схемы Томской ЭС можно провести поиск ОС при следующих условиях: отключение одной цепи воздушной линии (ВЛ) 220кВ Нижневартовская ГРЭС – ПС Советско-Соснинская и отключение одной цепи ВЛ 220кВ ПС Орловка – ПС Томская.

Нагрузочная и генераторная части ВИР должны поддерживаться равными, чтобы не вызывать перекос между мощностью генерации и потребления, поэтому для каждой составляющей ВИР задается безразмерный коэффициент участия либо в нагрузке –  $K_H$ , либо в генерации –  $K_G$ .

Для поиска ОС в системообразующей сети Томской ЭС была создана цифровая модель в ПК RastrWin с модулем ТКЗ и заданы ВИР в определенных узлах с изменением параметров по генерации и по нагрузке.

Консоль тестирования поиска ОС представлена на рис. 1.

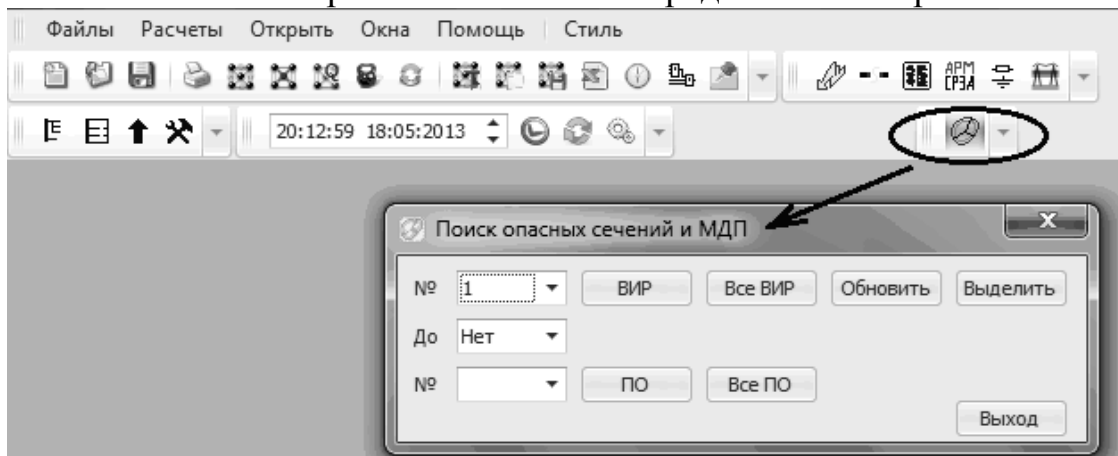
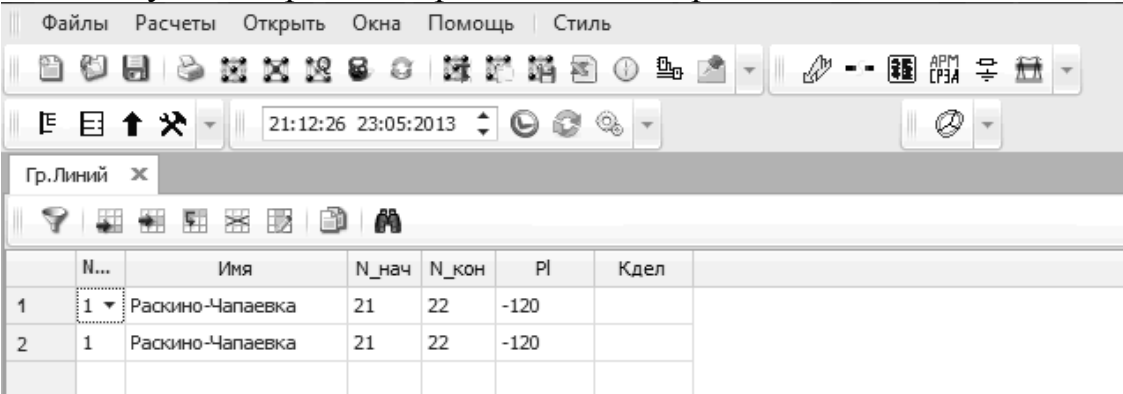


Рис. 1. Консоль поиска ОС

Запуск поиска ОС осуществляется с консоли нажатием клавиши «Все ПО».

Результаты расчета представлены на рис. 2.



	N...	Имя	N_нач	N_кон	PI	Кдел
1	1	Раскино-Чапаевка	21	22	-120	
2	1	Раскино-Чапаевка	21	22	-120	

Рис. 2. Результаты расчета

Таким образом, можно сделать вывод о том, что решение матрицы Якоби при вышеприведенных условиях работы Томской ЭС дало ОС, представленное ВЛ ПС Раскино – ПС Чапаевка.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.:Издательство НЦ ЭНАС, 2004
2. Гуревич Ю.Е. и др. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. / Либова Л.Е., Окин А.А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

Научный руководитель: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

### **АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕТИ**

Н.Ш. Чемборисова, И.В. Буков  
Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический институт

Сложная ЭЭС чаще всего неоднородна, что проявляется в том, что параметры режима некоторых элементов ЭЭС (узлов, связей) в среднем относительно сильнее реагируют на возмущения. Возмущения в разных местах ЭЭС могут вызывать заметную реакцию одних и тех же параметров режима: при разной локализации возмущений

больше всего изменяются модули напряжения в одних и тех же узлах, перегружаются по току одни и те же элементы [1]. В связи с этим узлы сети разделяют на сенсорные, модули напряжений которых сильнее всего изменяются при одних и тех же внешних возмущениях, и жесткие, имеющие противоположные свойства [1,2]. Особенно полезен такой анализ свойств узлов в интеллектуальной сети, которая может быть достаточно сложной, имеющей большое количество различных устройств управления, трансформаторов и кольцевых схем в своем составе [3].

Неоднородность ЭЭС, приводящая к появлению сенсоров, определяется во многом схемой ЭЭС и ее параметрами, причем в принципе можно выделить такие элементы ЭЭС, изменение параметров которых в наибольшей степени влияет на величину реакции ЭЭС на возмущения. Именно с помощью этих параметров можно быстрее всего изменить свойства ЭЭС. Следовательно, наличие информации о том, какие элементы схемы служат причиной повышенной чувствительности ЭЭС к внешним возмущениям, позволяет целенаправленно улучшать свойства ЭЭС при ее развитии и учитывать эти свойства при эксплуатации. Оценить жесткость или сенсорность узлов до расчета установившегося режима можно по матрице узловых проводимостей, используя разность между собственной  $u_{ii}$  и суммой взаимных проводимостей  $u_{ij}$  для каждого  $i$ -го узла [4]. В остальных случаях необходимы расчет и утяжеление режима в каждом узле или использование сингулярного анализа [1], что увеличивает объем расчетов.

Результаты расчета установившихся режимов часто используются при решении задач управления режимами, оценки их допустимости, анализе статической устойчивости. Расчеты установившихся режимов сложных электрических систем проводятся в настоящее время только на ЭВМ. Алгоритмы, реализованные в промышленных программах для этих целей, основаны на применении нелинейных узловых уравнений в форме баланса мощностей или токов, использовании при расчетах матрицы Якоби  $J$  и матрицы узловых проводимостей, которая содержит полную информацию о конфигурации и параметрах электрической сети и может быть составлена непосредственно по схеме сети. Отметим, что получить матрицу узловых проводимостей можно до расчета режима и на это требуются небольшие объемы вычислений, поэтому целесообразен анализ параметров узлов сети, ранжирование по степени их жесткости, оценка влияния учета мощности в узле, пересчитанной в шунт, именно с использованием матрицы  $Y$ . Для 15 узловой схемы напряжением 110-220 кВ, приведенной на рис. 1, рассматривались для примера значения разницы  $\Delta Y = \Delta G + j\Delta B$

между собственной проводимостью узла и суммой его взаимных проводимостей с учетом и без учета нагрузки, представленные на рисунке 2.

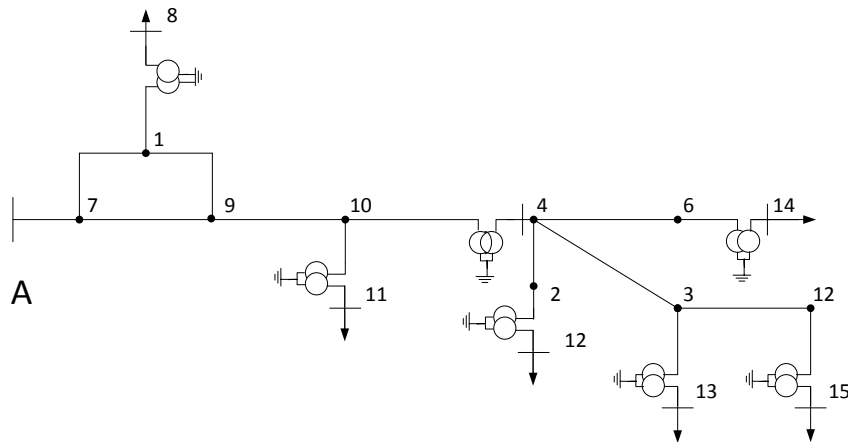


Рис. 1. Схема соединения сети

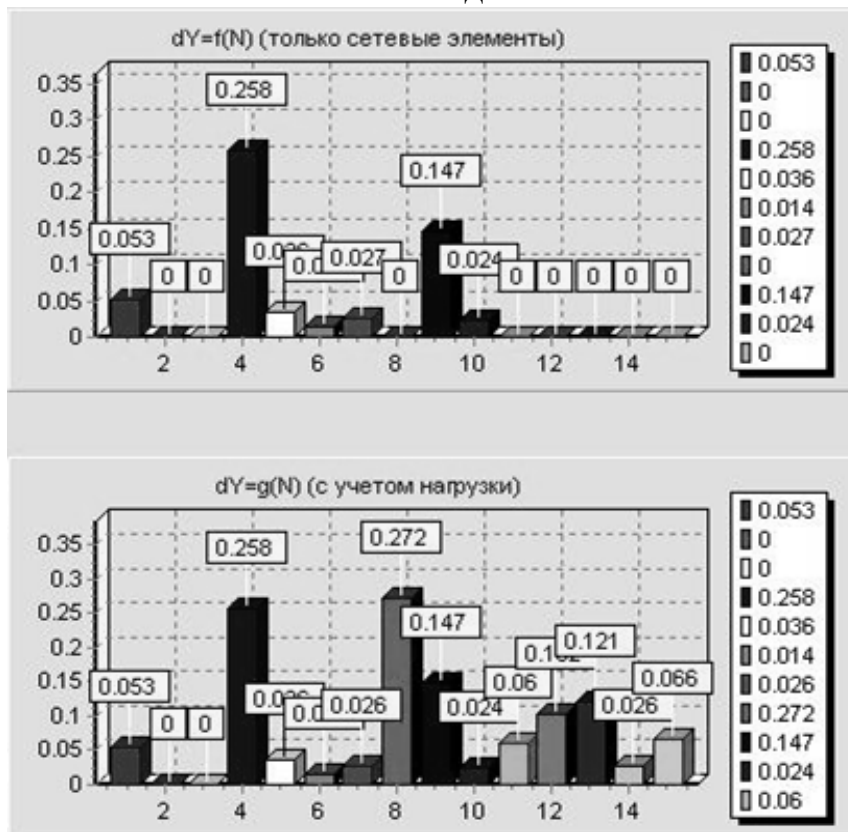


Рис. 2. Степени жесткости отдельных узлов

При сравнении параметров узлов, находящихся на одной ступени напряжения, получен вывод о необходимости учета нагрузки при оценке жесткости отдельных узлов в рассматриваемой сети: без учета нагрузки самым жестким был узел 4, а с учетом – узел 8. Следует отметить, что балансирующий по мощности узел 7 будет абсолютно жестким, поэтому отклонения напряжения для него будут равны ну-

лю. Если рассматривать ранжированный по степени жесткости список узлов, то интерес представит отношение отклонения напряжения в сенсорном 10 и жестком 8 узле. При изменении нагрузки в разных узлах (узлах утяжеления) сети это отношение составляет величины, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Отношение отклонений напряжения от базовых в сенсорном и жестком узлах.

Узел утяжеления	8	11	12	15
Отношение	9.5	10	24	25

Результаты расчетов, приведенные в таблице 1 показывают, что в жестком узле отклонение напряжения от его значения в базовом режиме меньше, чем в сенсорном. Отношение составляет величины от 9.5 до 25, то есть наибольший интерес будет представлять контроль напряжения в сенсорном узле, а приведенное соотношение может характеризовать степень тяжести режима утяжеления. Утяжеление изменением нагрузки в жестком узле является менее тяжелым, чем изменение нагрузки в более сенсорных 11, 12, 15 узлах, что соответствует представлению о сенсорности и жесткости узлов. Тогда по полученным отношениям можно сделать вывод об организации утяжеления увеличением нагрузки в сенсорных узлах, так как это быстрее всего приведет к недопустимым отклонениям напряжения в рассматриваемой сети. Напряжение в жестких узлах при этом изменяется слабее всего, и его можно не контролировать. Тогда при анализе режимов в интеллектуальной сети можно формализовано до расчета режима или оценки статической устойчивости выбрать узлы, напряжение которых будет изменяться сильнее всего, и узлы утяжеления. Такой подход позволяет уменьшить объем расчетов и количество контролируемых по напряжению узлов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Савоськин Н.Е. /Надежность электрических систем – Пенза: Пенз.гос.ун-т, 2004. 102с.
2. А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336с.
3. О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1998. 256 с.

4. О.В. Фролов, Н.Ш. Чемборисова, Н.С. Мулиц Формализованная установка устройств управления режимами в сетях мегаполисов //Электричество, 2012, №5

Научный руководитель: Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., профессор, кафедры Электроэнергетические системы Национального исследовательского университета Московского энергетического института.

## **СОПОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАНЖИРОВАННОГО СПИСКА УЗЛОВ**

И.Н. Баширов

Филиал ОАО «Научно-технический центр единой энергетической системы» «Технологии автоматического управления»

В процессе функционирования сложная электроэнергетическая система (ЭЭС) подвергается различным большим и малым возмущениям (внешним воздействиям), на которые реагирует изменением параметров режима — модулей и фаз напряжений, перетоков мощностей и токов в ее элементах и т.п. При этом изменение параметров различных элементов ЭЭС (узлы и связи) при возмущениях различно. В таком случае можно выделить группы элементов, параметры которых в большей степени изменяются при случайных изменениях схемы или режима, называемые «сенсорными» [1], а также группы элементов, параметры которых практически не изменяются при внешних воздействиях, называемые «жесткими» [2]. Такие же черты характерны для интеллектуальной сети, поэтому формализованный подход к анализу режимов, который рассматривается далее, будет одинаково полезен для этих систем.

При проектировании ЭЭС с большим количеством элементов сети проведение расчётов и анализа электрических режимов весьма затруднительно без использования системного подхода. Данное обстоятельство связано с тем, что при расчётах моделируются возможные аварийные, аварийно-ремонтные режимы (схемно-режимные ситуации), количество которых будет весьма значительным. Кроме того, расчет и обработка всех ситуаций занимает много времени и представляется достаточно сложной. В связи с этим необходима методика выбора именно тех элементов, рассмотрение которых представляет наибольший интерес.



Для наглядности проведем анализ изменения отклонения напряжения от номинальных значений в узлах схемы реальной ЭЭС, состоящей из 90 узлов, при изменении режимных параметров.

Как известно, статическая характеристика электрической нагрузки по напряжению имеет вид:

$$P(U) = P_0 P_*(U) = P_0 \left[ a_P \left( \frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2 + b_P \left( \frac{U}{U_{НОМ}} \right) + c_P \right]; \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_0 Q_*(U) = Q_0 \left[ a_Q \left( \frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2 + b_Q \left( \frac{U}{U_{НОМ}} \right) + c_Q \right]; \quad (2)$$

Первое слагаемое в квадратных скобках соответствует представлению нагрузки постоянной проводимостью, последнее слагаемое не зависит от напряжения и соответствует постоянному отбору мощности, то есть наиболее линейной и нелинейной моделям нагрузки при расчете установившихся режимов. В связи с этим, анализ изменения отклонения напряжения проведем для 4 вариантов представления нагрузок в узлах ЭЭС:

1. Нагрузка задана постоянным отбором мощности  $S_H$ :

$$S_H = P_H + jQ_H, \text{ МВА}; \quad (3)$$

2. Нагрузка задана шунтом проводимостью  $Y_H$ :

$$Y_H = G_H + jB_H = \frac{P_H + jQ_H}{U_{НОМ}^2}, \text{ МВА}; \quad (4)$$

3. Нагрузка задана шунтом проводимостью  $Y_H$ :

$$Y_H = G_H + jB_H = \frac{P_H + jQ_H}{U_{расч}^2}, \text{ МВА} \quad (5)$$

где  $U_{расч}$  – расчётное напряжение узла в нормальном режиме при 1-м варианте представления нагрузок;

4. Нагрузка в узлах равна нулю в базовом режиме.

Изменение режимных параметров для первого варианта моделировалось увеличением реактивной мощности нагрузки  $Q_H$  на 10 Мвар, для двух последующих вариантов увеличением реактивной проводимости шунта нагрузки  $B_H$  на 826 мкСм, что примерно соответствовало такому же как в первом варианте изменению мощности. Последний вариант позволяет оценить степень влияния параметров сети на построение ранжированного списка узлов. На рис. 1 – 4 показаны зависимости отклонений напряжения 9 краевых узлов, представляющих наибольший интерес.

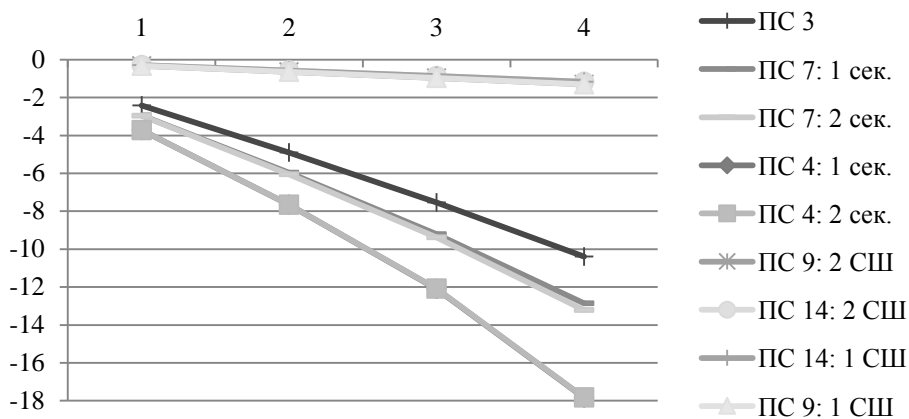


Рис. 1. Зависимости отклонения напряжения в узлах (в %) от реактивной нагрузки со смещением при моделировании нагрузки постоянным отбором мощности

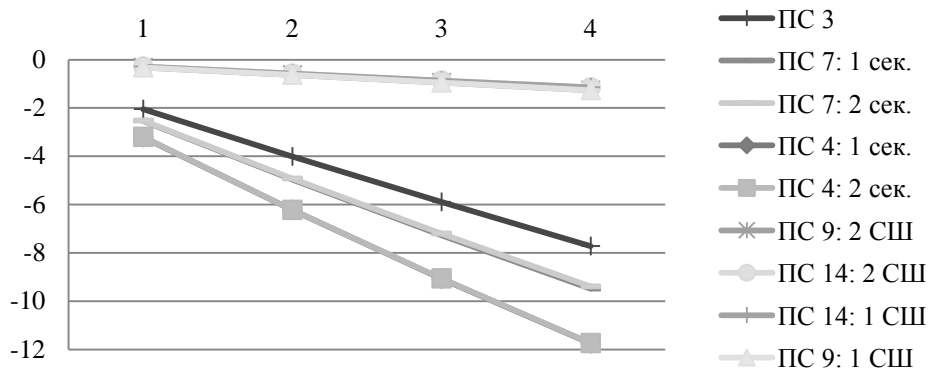


Рис. 2. Зависимость отклонения напряжения в узлах (в %) от проводимости шунта нагрузки со смещением при моделировании нагрузки шунтами проводимостью  $(P_H + jQ_H)/(U_{НОМ}^2)$

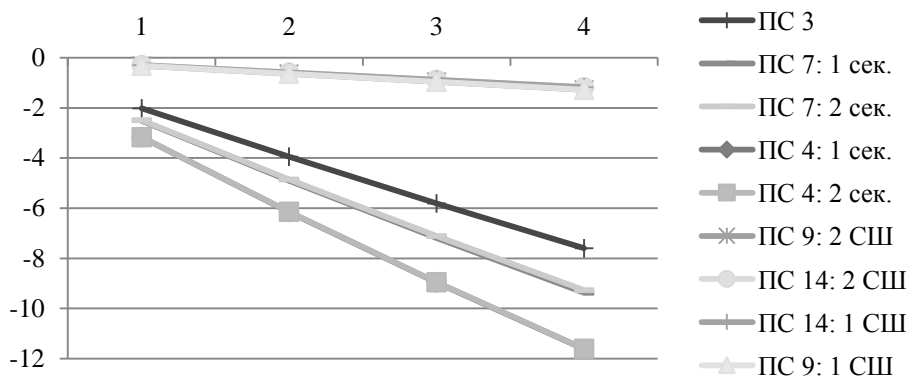


Рис.3. Зависимость отклонения напряжения в узлах (в %) от проводимости шунта нагрузки со смещением при моделировании нагрузки шунтами проводимостью  $(P_H + jQ_H)/(U_{расч}^2)$

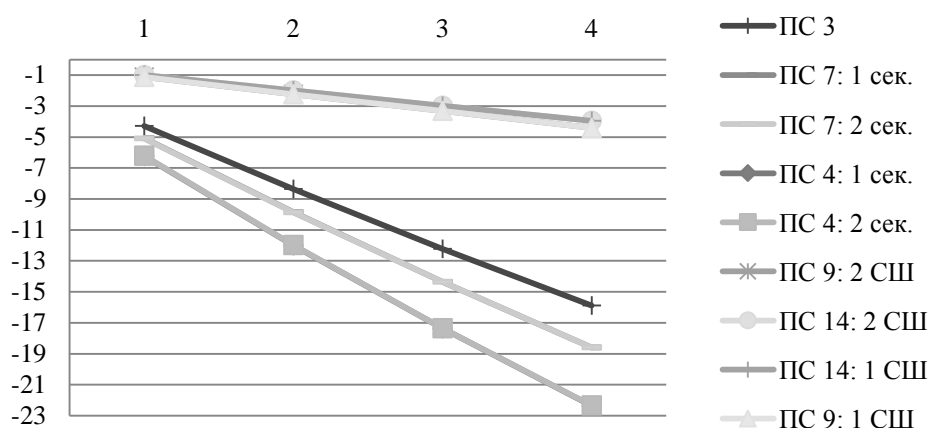


Рис. 4. Зависимость отклонения напряжения в узлах (в %) от проводимости шунта нагрузки со смещением в схеме без нагрузки.

Анализ приведенных зависимостей выявил группы узлов:

- «сенсорные» узлы (ПС 3, ПС 4:1сек., ПС 4:2сек., ПС 7:1сек.; ПС 7:2сек.), изменение напряжения в которых происходит достаточно интенсивно,
- «жесткие» узлы (ПС 9 1СШ, ПС 9 2СШ, ПС 14:1сек., ПС 14:2сек.), изменение в которых практически не происходит,
- промежуточные.

Распределение сенсорности (чувствительности) и жесткости по узлам схемы ЭС позволяет получить ранжированный по сенсорности список узлов с целью анализа изменения режимных параметров и в первую очередь в наиболее сенсорных узлах. Жесткие узлы особого интереса не представляют, так как уровни напряжения в них изменяются слабо.

Как видно на рис. 1 – 4, жесткие и сенсорные узлы остались таковыми в ходе утяжеления режима при всех формах задания исходной нагрузки в узлах.

Представленные зависимости позволяют сделать вывод о том, что распределение сенсорности и жесткости в схеме ЭС, в основном, определяется схемой сети и ее параметрами и практически не зависит от режимных параметров (изменений реактивной нагрузки, проводимости шунтов нагрузки), что очень важно при выборе перспективной схемы ЭС. В интеллектуальных сетях, для которых характерно наличие кольцевых схем, такой подход будет работать еще эффективнее.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем // Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Голуб И.И., Ефимов

Д.Н. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 256 с.

2. Надежность электрических систем // Савоськин Н.Е. – Пенза: Пенз.гос.ун-т, 2004. – 102 с.

Научный руководитель: Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., профессор каф. Электроэнергетические системы Национального исследовательского университета Московского энергетического института.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ФАЗНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ НЕЯВНЫМИ МЕТОДАМИ**

Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус  
Национальный технический университет  
Харьковский политехнический институт

Основным средством исследования электрических систем при современном уровне развития средств вычислительной техники является математическое моделирование. Сложившийся традиционный подход к разработке математических моделей электрических систем в стационарных и переходных режимах направлен на то, чтобы сложную задачу разделить на большое количество более простых подзадач, в результате чего разработано и используется большое количество эффективных, но узко специализированных моделей, которые не охватывают всех актуальных задач.

Такой подход был оправданным и единственно возможным на этапе развития электрических систем, когда средства моделирования были менее развиты и доступны. С изменением средств моделирования должен измениться и подход к решению задач. Вместо упрощения задачи, более актуальным становится унификация всех этапов моделирования и переход к разработке обобщенных алгоритмов, позволяющих в рамках одной математической модели решать не одну задачу, а комплекс взаимосвязанных задач.

Возможный вариант реализации такого подхода на основе уравнений в фазных переменных и неявных методов численного интегрирования представлен ниже.

Представление элементов в фазных переменных принято потому, что, во-первых, с появлением и развитием новых средств исследования переход от уравнений в фазных координатах к каким-либо другим становится излишним, и ранее применявшиеся методы анализа в

значительной степени обесцениваются, а, во-вторых, перейти к более полным и точным моделям в фазных переменных позволяют возможности современных ЭВМ.

Применение неявных методов обусловлено тем, что:

- при этом обеспечиваются более высокие точность и устойчивость вычислительных процессов;
- формулы неявных методов численного интегрирования и дифференцирования могут быть применены к уравнениям как системы в целом, так и к уравнениям отдельных элементов;
- уравнения всех основных элементов электрической системы – линий различного конструктивного исполнения, силовых трансформаторов, синхронных генераторов, синхронных и асинхронных электродвигателей могут быть представлены в единой унифицированной форме.

Воздушные линии электропередачи имеют разное конструктивное исполнение (одно- и двухцепные, с тросами, без тросов). Уравнения переходных процессов трехфазной ВЛ, например, одноцепной и без тросов, в фазных координатах имеют вид:

$$\begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{AA} & r_{AB} & r_{AC} \\ r_{BA} & r_{BB} & r_{BC} \\ r_{CA} & r_{CB} & r_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}$$

или, более компактно, в матричной форме:

$$[L]_{jj}^F \frac{d}{dt} [i]_j^F + [R]_{jj}^F [i]_j^F = [\Delta u]_j^F \quad (1)$$

Для получения дискретной модели воздушной или кабельной линии уравнения (1) необходимо представить в форме Коши:

$$\frac{d}{dt} [i]_j^F = [L]_{jj}^{F-1} [\Delta u]_j^F - [L]_{jj}^{F-1} [R]_{jj}^F [i]_j^F. \quad (2)$$

При использовании для дискретизации уравнений метода Эйлера-Коши

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2} (f_{k+1} + f_k)$$

исходные уравнения ВЛ аппроксимируются по формулам:

$$[i]_L^{(k+1)} = [i]_L^{(k)} + \frac{h}{2} \left( \frac{d}{dt} [i]_L^{(k+1)} + \frac{d}{dt} [i]_L^{(k)} \right). \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения для производных из (2), получим выражения:

$$[i]_j^{(k+1)} = [i]_j^{(k)} + \frac{h}{2} \left( [L]_{ij}^{-1} [u]_{ij}^{(k+1)} - [L]_{ij}^{-1} [R]_{ij} [i]_{ij}^{(k+1)} + [L]_{ij}^{-1} [u]_{ij}^{(k)} - [L]_{ij}^{-1} [R]_{ij} [i]_{ij}^{(k)} \right)$$

которые можно разрешить относительно токов  $[i]^{(n+1)}$ :

$$[i]_j^{(k+1)} = \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_j^{-1} [u]_j^{(k+1)} + \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_j^{-1} [u]_j^{(k)} + [K]_L^{(-1)} [i]_j^{(k)} - \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_j^{-1} [R]_{ij} [i]_j^{(k)}$$

где  $[K]_L = [E] + \frac{h}{2} [L]_j^{-1} [R]_{ij}$ ,  $[E]$  – единичная матрица.

Далее, полученные уравнения можно представить в виде:

$$[i]_{ij}^{(k+1)} = [Y]_{ij} [u]_{ij}^{(k+1)} + [Y]_{ij} [u]_{ij}^{(k)} + [A]_{ij} [i]_{ij}^{(k)}, \quad (4)$$

где  $[Y]_{ij}$ ,  $[A]_{ij}$  – матрицы, определяемые соответственно про-

дольными и поперечными параметрами участка трехфазной линии.

В уравнениях (4) токи фаз ВЛ на текущем шаге численного интегрирования уравнений переходных процессов выражены через напряжения фаз на текущем шаге и токи в обмотках на предыдущем шаге интегрирования. Расчет при этом сводится к вычислениям по формуле (4) в цикле, количество повторений которого определяется заданным временем расчета и шагом интегрирования.

Дифференциальные уравнения других элементов также можно представить в виде, аналогичном (1). Так, уравнения трансформатора и асинхронного двигателя в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix},$$

$$[L_{AД}] \frac{d}{dt} [i] + \left( \omega \left[ \frac{dL}{d\gamma} \right] + [R] \right) [i] = \begin{bmatrix} u_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Уравнения трансформатора отличаются только порядком и структурой матриц, а уравнения АД тем, что элементы матриц являются периодическими функциями. Алгоритм моделирования отдельно взятого элемента электрической системы должен содержать следующие этапы:

- ввод исходных данных (матриц параметров R и L моделируемого элемента);
- формирование матриц дискретных параметров Y и A элемента;
- расчет переходного процесса;
- подготовку к печати и печать результатов расчета (рис. 1).

Представленный алгоритм, хотя и сформулирован на примере дифференциальных уравнений линии, является достаточно общим, так как:

- при переходе к другим элементам будут меняться только матрицы параметров  $R, L$  элементов,
- при переходе к другим методам (кроме метода Эйлера-Коши) интегрирования будут меняться матрицы  $[Y], [A]$  дискретных параметров элемента на шаге и количество предыдущих шагов, учитываемых при расчете параметров (напряжений и токов) на текущем шаге.

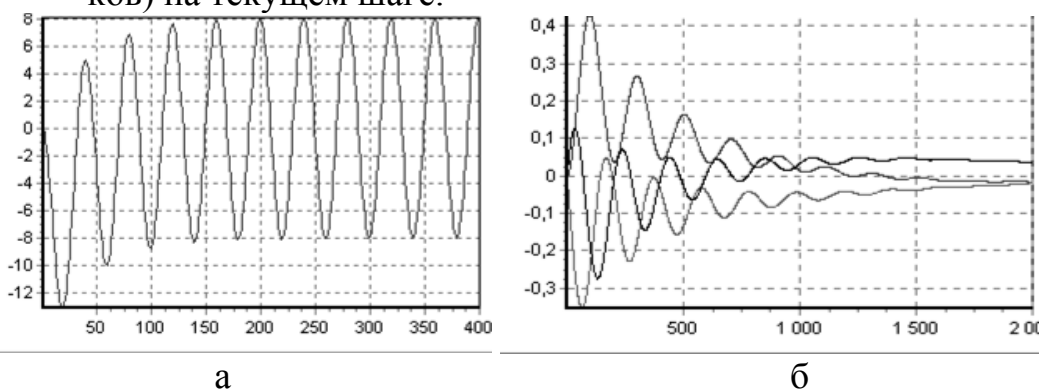


Рис. 1. Токи фаз при КЗ на линии (а) и на зажимах АД (б)

#### **Выводы:**

1. Формулы численного интегрирования дифференциальных уравнений переходных процессов неявными методами применимы к уравнениям как отдельных элементов, так и системы в целом. Это дает возможность сначала разрабатывать математические модели элементов, выполнять их программную реализацию и отладку в форме, удобной для включения в модель системы, а затем переходить к разработке и реализации модели системы в целом.
2. Представление математических моделей отдельных элементов системы в унифицированной форме позволяет унифицировать и вычислительные алгоритмы численного решения дифференциальных уравнений, относящихся к каждому из элементов, что снижает трудоемкость их программной реализации.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. - М.: Энергоиздат., 1986.

2. Гамазин С.И., Садыкбеков Г.А. Переходные процессы в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой. - Алма-Ата: Гылым, 1991, с. 301
3. Коськин Ю.П., Смирнова Н.Н. Расчёт переходных процессов в автономных электроэнергетических системах. // Электричество.- 1987.- № 4.- с. 5-9
4. Веприк Ю.Н. Базовая математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2010.- № 2. с. 37-42

Научный руководитель: Ю.Н. Веприк, д.т.н., профессор кафедры Передачи электрической энергии Электроэнергетический факультета Национального технического университета Харьковского политехнического института.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С АКТИВНО- ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Р.А. Мухин

Белорусский национальный технический университет

При работе сетей на нагрузку, потребляющую небольшие токи от выпрямителя, часто используют фильтры, включающие конденсатор; в наиболее простом виде — это С-фильтры. Такие фильтры для выпрямителя представляют емкостную нагрузку, которая заметно изменяет характер процессов в вентильном комплекте. Реальный источник питания в электроэнергетических сетях имеет активно-индуктивный характер.

Существующие методы расчета выпрямителя ориентированы на ручной счет, поэтому они основаны на целом ряде допущений и упрощений. Так, например, в [1] допускается, что диоды идеальные, также не учитываются все предвключенные сопротивления (сопротивления трансформатора, линии электропередачи). Метод Б.П.Терентьева, применяемый в проектной практике, основывается на допущении, что емкость конденсатора фильтра бесконечно большая, вследствие чего напряжение на нагрузке можно считать постоянным по величине.

Новейшие компьютерные технологии сегодня позволяют выполнять решение систем дифференциальных уравнений численными



методами. Авторами предлагался дифференциальный метод расчета выпрямительных схем с численным решением в MathCAD.

Для нахождения сглаженного напряжения необходимо найти напряжение на конденсаторе, для чего используется расчет переходных процессов классическим методом. Расчет сводится к решению системы дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа. Установившийся режим наступает после практического завершения переходных процессов. После этого можно определять среднее значение напряжения, коэффициенты сглаживания и пульсаций. В MathCAD для численного расчета используется стандартная встроенная функция *Rkadapt* с решением дифференциальных уравнений по методу Рунге-Кутты.

Авторами разработан алгоритм расчета среднего значения напряжения выпрямителя с емкостным фильтром, работающего на активную нагрузку, с учетом конечных значений емкости конденсатора фильтра и сопротивления фазы выпрямителя (активного и индуктивного). Разработана программа расчета на ЭВМ среднего значения выпрямленного сглаженного напряжения. Результаты расчета по программе сравнивались с результатами, полученными по существующим методикам и опытным путем.

По разработанной программе были выполнены расчеты. На рисунке 1 приведены зависимости коэффициентов пульсаций для разных значений емкостей сглаживающих фильтров в зависимости от индуктивности источника питания при сопротивлении нагрузки 200 Ом.

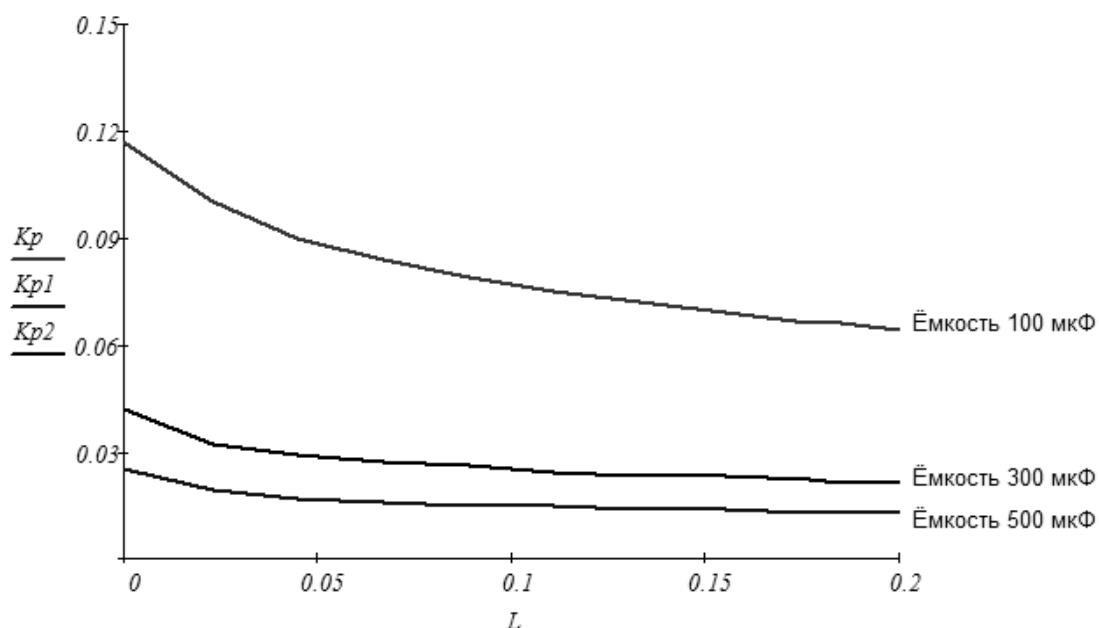


Рис. 1. Зависимость коэффициента пульсаций от индуктивности

источника питания при разных значениях емкостей С-фильтра

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Теоретические основы электротехники, часть 2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / Г.И. Атабеков [и др.]; под ред. Г.И.Атабекова – СПб.: Лань, 2009. - 432 с.

Научный руководитель: Ю.В. Бладыко, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Электротехники и электроники Белорусского национального технического университета.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЦЕПИ**

А.И. Ворачева

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2Г

Курс «Переходные процессы в электрических системах» является одним из профилирующих для электроэнергетических специальностей, и его положения используются как при проектировании, так и при управлении функционированием электроэнергетических систем и систем электроснабжения предприятий [2].

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и т.д.), так и в аварийных условиях (обрыв провода, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т.д.). Их изучение необходимо прежде всего для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов, а так же для разработки методов их количественной оценки, для того чтобы можно было предвидеть и заранее предотвратить опасные последствия таких процессов.

Переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Но при относительно малых возмущениях (короткое замыкание за большим сопротивлением) весь переходный процесс можно рассматривать только как электромагнитный [3].

Рассмотрение электромагнитных переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами реализовано в виде разработки ме-

тодических указаний для выполнения лабораторной работы по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах». Лабораторная работа ставит целью более детально рассмотреть ряд узловых положений курса путем проведения экспериментальных исследований на ПЭВМ и осмысления результатов, приобретения навыков инженерного мышления [2].

Целью данной лабораторной работы является исследование влияния режима, предшествующего короткому замыканию, и момента возникновения короткого замыкания на токи в элементах сети.

В данной работе используется простейшая трехфазная цепь с сосредоточенными активными и индуктивными сопротивлениями, питание которой осуществляется от источника бесконечной мощности.

На рис.1 представлена простейшая симметричная трехфазная цепь. В ней условно принято, что на линейном участке имеется взаимная индукция между фазами (M). Цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения с неизменными амплитудой и частотой. Тип нейтрали – изолированная [1].

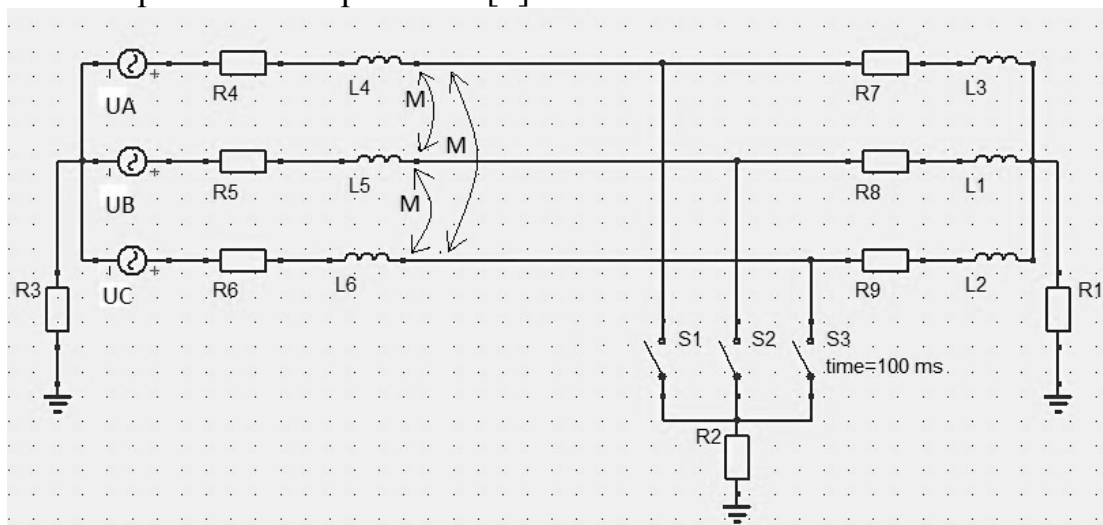


Рис. 1. Принципиальная схема простейшей трехфазной цепи

После замыкания трехфазного ключа S (S1, S2 и S3) цепь распадается на два независимых друг от друга участка. Участок с нагрузкой оказывается зашунтированным короткой в месте КЗ, и токи в каждой фазе будут поддерживаться за счет запасенной в индуктивностях энергии и затем выделяться в виде тепла на активном сопротивлении.

Интерес представляет участок цепи, который остался присоединенным к источнику. Дифференциальное уравнение равновесия мгновенных токов и напряжений для любой фазы, например фазы А, этого участка

$$U_A = i_A \cdot R_{\Sigma} + L \cdot \frac{di_A}{dt} + M \cdot \frac{di_B}{dt} + M \cdot \frac{di_C}{dt} \quad (1)$$

Где  $L$ -собственная индуктивность фазного провода,  $M$  - взаимноиндуктивность между отдельными проводами.

Имея в виду, что

$$(i_B + i_C) = -i_A \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид:

$$i = \frac{U_M}{Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{A(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (3)$$

Где  $Z$  – полное сопротивление присоединенного к участку источника цепи,  $\varphi_k$  – угол сдвига тока в этой цепи,  $T_a$  – постоянная времени цепи короткого замыкания [1].

Здесь помимо свободного тока будет присутствовать принужденный ток, величина которого больше тока предыдущего режима и сдвиг по фазе в общем случае иной.

Анализируя решение (3) обнаруживаются две составляющие: периодическая слагающая тока КЗ  $i_k$  и аperiodическая  $i_a$ .

Первая составляющая – принужденный ток с постоянной амплитудой  $I_{\text{пн}}$ . Соответственно вторая составляющая представляет затухающий по экспоненте ток – аperiodическая слагающая тока. Графически это представлено на рис.2.

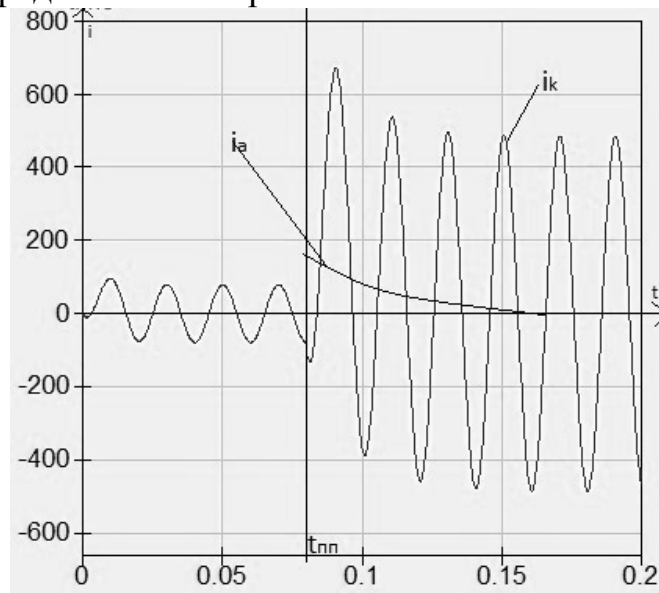


Рис. 2. Осциллограмма тока переходного процесса

Наибольшее значение аperiodической составляющей определяется не только фазой включения, но так же предшествующим режимом цепи.

В практических расчётах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют ударным током короткого замыкания  $i_y$ , обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей, считая, что он наступает приблизительно через полпериода с момента возникновения короткого замыкания.

Таким образом, выражение для ударного тока короткого замыкания можно записать в следующем виде:

$$i_y = k_y \cdot I_{ПМ} \quad (4)$$

Где

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{Ta}} \quad (5)$$

Который называют ударным коэффициентом, показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей, его величина находится в пределах  $1 < k_y < 2$  [1].

Естественно, что апериодические слагающие токов в фазах различны, поэтому определение трехфазного короткого замыкания как симметричного, справедливо применительно к периодическим слагающим фазных токов.

В данной работе предлагается смоделировать простейшую трехфазную цепь в программной среде Qucs. Qucs, также известный как Quite Universal Circuit Simulator, был разработан как доступный симулятор электронных цепей и контуров, имеющий графический интерфейс. Программа поддерживает все виды моделирования схем: на постоянном, переменном токе, моделирование переходных процессов и многое другое. Результаты моделирования можно посмотреть на странице презентации или окне программы, что очень удобно при анализе результатов, т.к. изменение контролируемых параметров представлено в виде графиков.

В качестве задания предлагается для двух конфигураций цепей: с нагрузкой и без, по уравнениям тока короткого замыкания, приведенным выше, рассчитать значение принужденного, свободного тока КЗ в фазе и ударный коэффициент. Затем произвести моделирование в предлагаемой программной среде и сравнить результаты моделирования с расчетными значениями. Так же необходимо выявить режим, при котором апериодическая составляющая тока КЗ наибольшая и обосновать результат.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. –М.:Энергия, 1964. –518 с.,1970. –518 с.
2. Готман В.И Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Методические указания к выполнению лабораторных работ. – Томск.: Издательство ТПУ, 2003. – 40 с., ил.
3. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. –Томск:Изд. ТПИ, 1969. –388 с.

Научный руководитель: К.И. Заповодников, к.т.н., доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

## **КОРРОЗИЯ КАК ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА ПОЛОМОК ТЕПЛОСЕТЕЙ И МЕТОДЫ ЕЁ ДИАГНОСТИКИ**

Д.Ю. Ивлева

Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП, группа 5Б1В.

В числе наиболее актуальных для теплоэнергетики задач значатся проблемы обеспечения эксплуатационной надежности, безопасности, увеличения коэффициента использования установленной мощности, продления срока службы и повышения эффективности работы действующих тепловых сетей (ТС). При этом главное внимание уделяется коррозионной стойкости трубных пучков поверхностей нагрева. Основной причиной возникновения внешней коррозии является подток к трубе грунтовых вод, а внутренней коррозии – растворённый в воде воздух [1]

## повреждение ТС в г.Томске

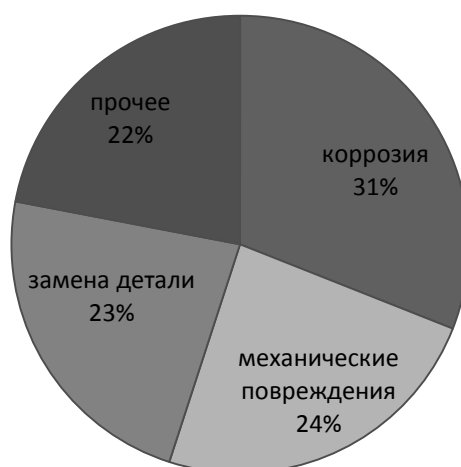


Рис. 1. Состояние центрального теплоснабжения г. Томска за 2011г.

Из данной диаграммы видно, что на коррозию (внутреннюю и внешнюю) приходится большая часть повреждений ТС – 31% от общего числа.

От внешней коррозии и от теплопотерь ТС защищает изоляция. На сегодняшний день существует несколько основных видов изоляции труб. Самой простой и недорогой является стекло- или минеральная вата, но, по мнению специалистов, эта технология заметно устарела. К ее недостаткам можно отнести недолговечность (даже при очень качественно монтаже срок службы не более 7 лет), а также низкую скорость монтажа. Альтернатива непрактичной стеклоизоляции – специальные скорлупы, сделанные из пенополиуретана (ППУ). Плюсами их является то, что они дают возможность сократить сроки монтажа трубопроводов любой сложности, обеспечивают быстрый доступ к поврежденным участкам, пригодны для многократного использования. Так же сегодня применяют многослойное полиэтиленовое полимерное покрытие, наносимое на трубы в заводских условиях. Но этой изоляцией покрывают в основном трубы для нефте-газовых передач. К сожалению, большое количество ТС, особенно наземных, сейчас покрыты стекло- или минеральной ватой. Это покрытие неэффективное и устаревшее, но из-за своей дешевизны всё ещё часто встречается на теплотрассах. В тепловых сетях страны, по экспертным оценкам, при норме 5—6% ежегодно теряется около (как сказано в «Промышленных Ведомостях» № 7-8, июль, август 2006 ) 20% всей вырабатываемой тепловой энергии, или почти 420 млн. гигакалорий. Для их производства ежегодно впусую сжигается примерно 80 млн. тонн

условного топлива, тогда как в стране потребляется в том же условном исчислении около 270 млн. тонн. Одна такая тонна оценивается по себестоимости сейчас в среднем в 1200 рублей. Таким образом, обогрев в России окружающей среды обходится как минимум почти в 100 млрд. рублей. И всё это, в основном, из-за некачественной изоляции [2].

Чтобы обнаружить повреждения на ТС пользуются различными методами. Но, к сожалению, у всех этих методов есть свои недостатки.

Таблица 1. Основные виды диагностики ТС [3]

Метод диагностики ТС	Достоинства	Недостатки
Корреляционный метод	Высокая точность определения места утечек	Может обнаруживать только утечки. Необходимость колодцев. Трудоёмкость
Тепловизионный метод:	Позволяет с высокой точностью оценить состояние теплоизоляции и обнаружить утечки	Подходит только для наземных ТС. Выдаёт утонение стенки трубы за поломку
Тепловая инфракрасная аэросъемка	Единственный дистанционный метод. Подходит для диагностики как наземных, так и подземных ТС	Может применяться только весной-осенью – когда нет снега, и ТС функционируют. Выдаёт утонение стенки трубы за поломку
Метод акустической эмиссии	Наивысшее отношение эффективность/стоимость в области неразрушающего контроля и диагностики. Широкий диапазон применения по материалам. Высокая чувствительность к расту-	Обнаруживает и регистрирует только развивающиеся дефекты



	щим дефектам	
Метод магнитной памяти металла.	Выявляет участки с повышенным напряжением металла	Необходим прямой доступ к трубе.
Опрессовка на прочность повышенным давлением	Эффективность нахождения дефекта 93-94%. Обнаруживает слабые места ТС в ремонтный период	Разрушение трубы
Акустический метод.	Наземный метод. Хорошо подходит для определения свищей	Невысокая точность определения дефекта. Влияние окружающего звукового фона

Т.к. на данный момент не существует метода, который позволил бы контролировать состояние ТС на протяжении всей её эксплуатации, то напрашивается вопрос о создании такого метода. Т.к. основной причиной повреждений труб является коррозия, то вполне возможно создать устройство, которое позволяло бы определить благоприятные условия для образования коррозии. Поскольку внешняя коррозия возникает из-за подтока воды к трубе, совершенно ясно, что для контроля состояния ТС необходимо знать влажность и температуру в двух точках – между трубой и изоляцией и за изоляцией. Допустим, это новое устройство будет небольшим, и будет состоять из двух датчиков:

1. Датчик, для измерения температуры
2. Датчик, для измерения влажности
3. Мини-процессор для обработки информации
4. Источник энергии, а точнее преобразователь тепловой энергии в электрическую.

Предположим, что разброс температуры от 0 до 150 0С. Большая чувствительность термопары к скачкам, скажем в 1 градус, нам не важна. Для этих целей лучше всего подойдёт термопара типа Т (медь-константан), т.к. его диапазон -250 +3000С, он может работать в среде с недостатком или избытком воздуха и, самое главное, эта термопара не чувствительна к повышенной влажности. Допустим, влажность колеблется от 0 до 100%.

Предположим, что разброс влажности от 0 до 100%. Нам нужен датчик, который измерял бы влажность земли в условиях недостатка кислорода.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Артамонцев А. И. Коррозионное проявление микроструктурных повреждений в трубах тепловоспринимающих элементов и трубопроводных систем – Т., 2007
2. Гельман М. Закон «О техническом регулировании» развала российской экономики // Промышленные Ведомости № 7-8, июль, август 2006
3. Ивлева Д.Ю. Основные повреждения ТЭС г. Томска и методы диагностики этих повреждений // Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность.

Научный руководитель: Е.В. Кравченко к.т.н., доцент кафедры АТП ЭНИН ТПУ.

## ДООПТИМИЗАЦИЯ СУТОЧНЫХ РЕЖИМОВ ГЭС

К.С. Колясников, П.М. Ерохин  
Уральский федеральный университет имени Первого Президента  
России Б. Н. Ельцина

**Введение.** Рассмотрим задачу дооптимизации суточных режимов гидравлических электростанций в условиях конкурентного рынка. В качестве критерия оптимизации используем критерий минимума стоимости электроэнергии производимой на ТЭС.

В условиях конкурентного оптового рынка электроэнергии Системным оператором, на каждый час расчетных суток, производятся расчеты режимов работы ТЭС, ГЭС и потребителей с регулируемой нагрузкой, а также перетоков по сечениям экспорта/импорта. В существующей методике расчетов [1] режимы ГЭС учитываются в качестве интегральных ограничений-равенств на суммарную суточную (почасовую) выработку электроэнергии. Этот подход не учитывает некоторые особенности функционирования ГЭС, а именно, изменение уровня нижнего бьефа при изменении режима работы ГЭС и увеличение расхода воды вследствие невыпуклой реальной расходной характеристики ГЭС [2].

Расчет режимов осуществляется с учетом, потерь и перетоков мощности в сети, прогнозного спроса, а также заявленных цен на загрузку и разгрузку в отношении ТЭС и потребителей с регулируемой нагрузкой. Связь между суточными и недельными режимами ГЭС осуществляется с помощью функции последствия [2].

В указанной постановке мы имеем задачу нелинейного математического программирования:

$$\sum_{t=1}^T I_t + I_{\text{посл}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

с ограничениями по заданным среднеинтервальным расходам воды:

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_t = Q_{\text{ср}}, \quad (2)$$

по балансу активной и реактивной мощности в узлах сети:

$$P_{jt} - U_j^2 G_{jj} - U_j \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m+1} U_k (G_{jk} \cos \delta_{jk} - B_{jk} \sin \delta_{jk}) = P_{\text{н} jt}, \quad (3)$$

$$Q_{jt} - U_j^2 B_{jj} - U_j \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m+1} U_k (B_{jk} \sin \delta_{jk} + G_{jk} \cos \delta_{jk}) = Q_{\text{н} jt}, \quad (4)$$

по диапазону регулирования активной и реактивной мощности:

$$P_{\text{ТЭС min}} \leq P_{\text{ТЭС}} \leq P_{\text{ТЭС max}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{ГЭС min}} \leq P_{\text{ГЭС}} \leq P_{\text{ГЭС max}}, \quad (6)$$

$$Q_{\text{ТЭС min}} \leq Q_{\text{ТЭС}} \leq Q_{\text{ТЭС max}}, \quad (7)$$

$$Q_{\text{ГЭС min}} \leq Q_{\text{ГЭС}} \leq Q_{\text{ГЭС max}}, \quad (8)$$

по предельным перетокам контролируемых сечений:

$$P_{\text{min } s} \leq P_s \leq P_{\text{max } s}, \quad (9)$$

$I$  – суммарная стоимость электроэнергии, производимой на ТЭС, (издержки потребителей),  $I_{\text{посл}}$  – функция последствия,  $Q$  – расход воды через турбины ГЭС,  $Q_{\text{ср}}$  – заданный среднеинтервальный расход воды,  $P_{\text{ТЭС}}$ ,  $P_{\text{ГЭС}}$ ,  $Q_{\text{ТЭС}}$ ,  $Q_{\text{ГЭС}}$ , – активная и реактивная мощность ТЭС и ГЭС,  $P$ ,  $P_{\text{н}}$ ,  $Q$ ,  $Q_{\text{н}}$  – генерация и потребление активной и реактивной мощности в  $j$ -м узле энергосистемы,  $\delta$  и  $U$  – фаза и модуль напряжения,  $P_s$  – переток по  $s$ -му контролируемому сечению,  $m$  – количество узлов,  $T$  – количество часов планирования  $G_{jj}$ ,  $B_{jj}$ ,  $G_{jk}$ ,  $B_{jk}$  – активные и реактивные собственные и взаимные проводимости узлов сети.

В настоящей работе рассматривается применение алгоритма внутренней точки [3] для оптимизации недельных режимов совместно работающих тепловых и гидравлических электростанций. В данном алгоритме сходимость к решению основывается на применении метода доверительной области. Соблюдение нелинейных ограничений осуществляется с помощью, так называемого, фильтра, который создает эффективные границы при изменении независимой переменной.

**Метод внутренней точки для нелинейного программирования.** Запишем условия поиска экстремума целевой функции (1) с ограничениями (2)-(9) в математической нотации [3]:

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$h(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (11)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \quad (12)$$

Опуская математические выкладки [3], укажем, что значение точки на каждой итерации определяется формулой:

$$\omega_{\eta+1} = \omega_{\eta} + \alpha^n(\Delta)\omega_{\eta}^n + \alpha^t(\Delta)\omega_{\eta}^t$$

$\omega = (x, y, z_1, z_2)^T$ ,  $y, z_1, z_2$  – множители Лагранжа к ограничениям равенствам и неравенствам;  $\eta$  – номер текущей итерации,  $\omega_n, \omega_t$  – нормальный и тангенциальный шаг,  $\alpha_n$  и  $\alpha_t$  – длина шага вдоль нормальной и тангенциальной составляющей соответственно.

Шаг в методе внутренней точки определяется на основе решения следующей системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} G + (X - X_{\min})^{-1}Z_1 + (X_{\max} - X)^{-1}Z_2 & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \omega = \begin{bmatrix} r_1 + r_3 + r_4 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

где  $G$  – Гессиан функции Лагранжа задачи (10) – (12),  $A = \frac{dh(x)}{dx}$ .

Для вычисления нормального шага в (13) устанавливаем:  $r_1 = 0$ ,  $r_2 = -h(x)$ ,  $r_3 = -z_1 + (X - X_{\min})^{-1}\mu e$ ,  $r_4 = -z_2 + (X_{\max} - X)^{-1}\mu e$ , для тангенциального:  $r_1 = z_1 - \frac{\partial l}{\partial x} - A^T y - z_2$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = (X - X_{\min})^{-1}(\sigma - 1)\mu e$ ,  $r_4 = (X_{\max} - X)^{-1}(\sigma - 1)\mu e$ , где  $\sigma$  – центрирующий параметр;  $e$  – вектор, состоящий из единиц;  $\mu$  – барьерный параметр, заглавными буквами обозначены матрицы с соответствующими диагональными элементами.

Выбор радиуса доверительной области основывается на сравнении отношения фактического изменения значения целевой функции к предсказанному некоторой моделью. Это соотношение называется критерием достаточного снижения:

$$p = \frac{\text{фактическое снижение}}{\text{предсказанное снижение}} = \frac{\Theta_g(\omega) - \Theta_g(\omega(\Delta))}{m(\omega) - m(\omega(\Delta))}, \quad (14)$$

где  $\Theta_g(\omega) = \mu(\omega) + \|\nabla_x l(\omega)\|^2$ , – мера оптимальности. В качестве модели используется разложение  $\Theta_g(\omega)$  в ряд Тейлора в рассматриваемой точке:  $m(\omega(\Delta)) = \mu(\omega(\Delta)) + \|\nabla_x l(\omega) + \nabla_{\omega x}^2 l(\omega(\Delta))(\omega(\Delta) - \omega)\|^2, \nabla_x l(\omega), \nabla_{\omega x}^2 l(\omega(\Delta))$  – первая и вторая частные производные функции Лагранжа задачи (10) – (12) [3].

**Особенности реализации алгоритма.** Для решения задачи (1) – (9) без учета функции последствия, для случая заданного уровня верхнего бьефа на конец расчетов, обозначим вектор независимых переменных следующим образом:  $x = [P_{ТЭС} Q_{ТЭС} q_p P_{п} Q Q_{ГЭС} \delta U]^T$ , где  $Q$  – расход воды через гидротурбины ГЭС,  $Q_{х.с.}$  – расход холостых сбросов через гидроузел,  $P_{ТЭС}, P_{ТЭС}$  – активная мощность ТЭС и по-

требителей с регулируемой нагрузкой,  $Q_{ТЭС}$ ,  $Q_{ГЭС}$  – потребляемая/вырабатываемая реактивная мощность ТЭС и ГЭС,  $q$  и  $p$  – фиктивные переменные,  $\delta$  и  $U$  – фаза и модуль напряжения.

При необходимости расчетов с использованием функции последствия к вектору независимых переменных добавляется компонента  $W$ , соответствующая уровням верхнего бьефа на конец рассматриваемого суточного интервала планирования. При этом ограничение (2) необходимо поменять на уравнение баланса воды следующего вида:

$$W_K + 0,864^{-4}Q = W_H + 0,864^{-4}\varphi, \quad (14)$$

где  $W_H$ ,  $W_K$  – объем воды в водохранилище на начало и конец рассматриваемых суток,  $\varphi$  – приток к створу рассматриваемой ГЭС в рассматриваемые сутки.

Ограничения по балансу активной и реактивной мощности по отношению к вектору независимых переменных по компонентам  $Q$ ,  $\delta$ ,  $U$  и  $W$  являются нелинейными. Их линейризация производится с помощью разложением в ряд Тейлора [4,5] с отбрасыванием членом с порядком больше чем единица. При этом относительные приросты по расходу воды рассчитываются на заданный среднесуточный напор.

Основываясь на том, что целевая функция (1) имеет единственный экстремум [4,5], критерий (14) запишем в следующем виде:

$$p = \frac{f(P_{ТЭС}) - f(P_{ТЭС}(\Delta))}{m(P_{ТЭС}) - m(P_{ТЭС}(\Delta))}, \quad (15)$$

где  $f(P)$  и  $f(P(\Delta))$  – значения целевой функции в текущей и новой точках,  $m(P(\Delta)) = c \cdot P + c \cdot (P(\Delta) - P)$ , здесь  $P$  – суммарная мощность ТЭС и ГЭС на текущей итерации,  $c$  – цена на продажу электроэнергии, соответствующая мощности  $P$ .

#### **Выводы:**

1. Разработан основанный на методе внутренней точки алгоритм для суточной дооптимизации режимов ГЭС.
2. В исходном алгоритме предложен расчет критерия достаточного снижения по соотношению изменения значения целевой функции к изменению значения ее линейной модели.
3. В ходе численных экспериментов выявлена необходимость расчета мощности ГЭС по линейризованным уравнениям на заданный среднесуточный напор.
4. Разработанный алгоритм может быть использован для планирования суточных режимов электроэнергетических систем.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Давидсон М.Р. и др. Математическая модель управления энергосистемой в условиях конкурентного оптового рынка электроэнергии и мощности в России // Известия РАН. Теория и системы управления.- 2009.- N 2.- С. 84-94.
2. Цветков Е.В. и др. Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах /Цветков Е.В., Алябышева Т.М, Парфенов Л.Г.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 304 с.: илл.
3. Ulbrich M. и др. A globally convergent primal-dual interior-point filter method for nonlinear programming // Mathematical Programming.- 2004.- N 100.- С. 379–410.
4. Цветков Е.В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами ГЭС на ЦВМ. М.: Энергия, 1967.- 135 с.: илл.
5. Идельчик В. И. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.- 288 с.: илл.

Научный руководитель: П.М. Ерохин, д.т.н., Советник заместителя Председателя Правления ОАО «СО ЕЭС»

## **ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ПРИМЕРЕ ОДНОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С АРВ**

Д.Ф. Мавлетчина

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2Г

Теория статической устойчивости электрических систем основывается на методах приближения Ляпунова и сводится к исследованию устойчивости систем дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые энергосистемы.

Статическая устойчивость, или устойчивость исходного установившегося режима – это способность электрической системы возвращаться в исходное состояние (исходный режим) после малого его возмущения (отклонения режимных параметров). Необходимым и достаточным условием статической устойчивости проверяемого режима электрической системы является наличие отрицательных знаков у вещественных частей всех корней характеристического уравнения [1].

Для исследования статической устойчивости необходимо [1]: составить математическое описание переходных процессов в изучаемой системе в виде нелинейных дифференциальных уравнений; провести линеаризацию уравнений по первому приближению и получить систему линеаризованных уравнений; составить характеристический определитель; вычислить частные производные для исследуемого режима; определить устойчивость с помощью методов, выявляющих знак действительных корней характеристического уравнения.

При высокой степени характеристического уравнения вычисление его корней является весьма трудоёмкой операцией, поэтому часто используют некоторые математические условия, которые позволяют без вычисления корней определять наличие или отсутствие положительных знаков у их вещественных частей. В электроэнергетике эти условия называются математическими критериями статической устойчивости энергосистем, из которых выделяют алгебраические (критерии Рауса, Гурвица) и частотные (методы D – разбиения, критерии Михайлова, Найквиста).

Прежде чем приступить к непосредственному исследованию характеристического уравнения по математическим критериям, важно проверить, выполняются ли необходимые условия устойчивости. Для характеристического уравнения в полиномиальной форме

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0, \quad (1)$$

такими условиями являются неравенства

$$a_i > 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

При отрицательном значении хотя бы одного из коэффициентов уравнения (1) система заведомо неустойчива [2].

Применение критерия Рауса требует составления таблицы Рауса (табл. 1). Элементами её первой строки являются чётные коэффициенты характеристического уравнения (1) начиная с  $a_0$ . Элементы второй строки – нечётные коэффициенты начиная с  $a_1$ . Элементы последующих строк вычисляются по приведённым в табл. 1 формулам.

Таблица 1. Таблица Рауса

Вспомогательные коэф.	№ строки	№ столбца		
		1	2	3
–	1	$c_{11} = a_0$	$c_{12} = a_2$	$c_{13} = a_4$
–	2	$c_{21} = a_1$	$c_{22} = a_3$	$c_{23} = a_5$
$r_3 = c_{11}/c_{21}$	3	$c_{31} = c_{12} - r_3 c_{22}$	$c_{32} = c_{13} - r_3 c_{23}$	$c_{33} = c_{14} - r_3 c_{24}$
$r_4 = c_{21}/c_{31}$	4	$c_{41} = c_{22} - r_4 c_{32}$	$c_{42} = c_{23} - r_4 c_{33}$	$c_{43} = c_{24} - r_4 c_{34}$
...	...	...	...	...

Согласно критерию Рауса, для устойчивости энергосистемы необходимо и достаточно, чтобы элементы первого столбца таблицы Рауса имели одинаковый знак [3].

Критерий Гурвица формулируется следующим образом: для выполнения устойчивости и, следовательно, для расположения всех корней в левой полуплоскости, необходимо и достаточно, чтобы все  $n$  диагональных миноров матрицы (3) были положительными [4].

Из коэффициентов  $a_i, i = 0, 1, \dots, n$  этого уравнения составляется матрица Гурвица вида:

$$M_{\Gamma} = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

для диагональных подматриц которой вычисляются  $n$  определителей

$$\Delta_1 = [a_1]; \Delta_2 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{bmatrix}; \dots; \Delta_n = [M_{\Gamma}]. \quad (4)$$

Определитель  $\Delta_n$  матрицы Гурвица называется главным [2].

Задача установления совокупности значений выбираемых коэффициентов усиления, при которых характеристическое уравнение автоматически регулируемой системы имеет только корни, расположенные в левой полуплоскости и, следовательно, система статически устойчива, успешно решается методом  $D$ -разбиения. Методы  $D$ -разбиения могут осуществляться по одному и двум параметрам [5].

В качестве таких параметров наиболее часто выбирают коэффициенты усиления времени АРВ [1]. Выделение этих областей осуществляется в три этапа.

Сначала строятся граничные кривые и особые прямые, разделяющие пространство настроечных параметров на области, каждая из которых соответствует равному количеству корней характеристического уравнения с положительными вещественными частями. На втором этапе определяется область, соответствующая наименьшему количеству корней в правой полуплоскости на комплексной плоскости корней. Эта область называется претендентом на устойчивость. На последнем этапе уточняется, является ли область-претендент в действительности областью устойчивости.

Критерий устойчивости Михайлова принадлежит к числу частотных критериев и позволяет оценивать устойчивость замкнутой



системы по виду годографа, который может быть получен из характеристического уравнения [2].

Практическим применением определения статической устойчивости энергосистемы на основе данных критериев явилась разработка части лабораторного практикума по дисциплине «Методы расчёта устойчивости энергосистем». В лабораторной работе №1 для одномашиной энергосистемы требуется осуществить выбор параметров по условиям статической устойчивости с использованием метода *D*-разбиения, частотных и алгебраических критериев устойчивости, применяя в качестве инструментального средства систему компьютерной математики Mathcad.

Общая задача расчетов, связанных с настройкой автоматического регулятора возбуждения, заключается в том, чтобы посредством подбора коэффициентов усиления получить характеристическое уравнение, корни которого расположены в левой полуплоскости корней, для чего используются алгебраические и частотные критерии устойчивости [2].

Алгоритм выполнения лабораторной работы следующий. На примере одномашиной энергосистемы с заданными параметрами и с фиксированными коэффициентами усиления АРВ по напряжению, производится расчёт частных коэффициентов характеристического уравнения, с помощью которых вычисляются координаты точек кривой *D*-разбиения. Соответственно далее следует построение области *D*-разбиения в плоскости двух параметров, параметрами являются коэффициенты АРВ СД по частоте. На следующем этапе осуществляется выбор области-претендента на устойчивость, из области произвольно выбирается точка и осуществляется проверка области-претендента по критериям устойчивости Рауса, Гурвица и Михайлова.

Исследование статической устойчивости на примере простейшей одномашиной энергосистемы позволяет изучить применение алгебраических и частотных критериев. Поскольку все вычисления производятся в программном комплексе Mathcad, студенты имеют возможность наглядно представить свои расчёты.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических энергосистемах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.:Высш.шк.,1985. – 536 с. ил.

2. Хрущев Ю.В. Методы расчёта устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 176 с.
3. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчёта и справочный материал). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с., ил.
4. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления. Учебное пособие для вузов. – М.: Высш.шк., 1977. – 519 с. ил.
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем/Под ред. Л.А. Жукова. – М., Энергия, 1979. – 456 с., ил.

Научный руководитель: Н.П. Фикс, канд. пед. наук, доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

## **РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛЭП 110 КВ НА ПРИМЕРЕ РОСТОВЭНЕРГО И БУРЯТЭНЕРГО**

С.Б. Смагулов\*, Т.Б. Акимжанов\*\*  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ\*, группа 5АМ2В, РЦР\*\*

Проблема обеспечения качества электроэнергии (КЭ) является одной из важнейших, от которых зависит эффективность и надежность электроснабжения потребителей. По данным разработчиков ГОСТ Р54149-2010 в Российской Федерации ущерб от некачественной электроэнергии оценивается примерно в 20 млрд. руб. в год.

Согласно Приказу Минэнерго РФ №326 от 30.12.2008 нагрузочные потери электроэнергии в элементах электрических сетей рассчитаны методом оперативных расчетов и средних нагрузок, как «идеальный», т.е. не учитываются добавочные потери, возникающие вследствие несимметрии и несинусоидальности токов в элементах сети.

Уточнение расчета потерь позволит инженерным службам по эксплуатации электрических сетей более точно рассчитывать балансы потребления электроэнергии при проведении энергетических обследований. Как правило, вследствие неточности расчета потерь существует практика относить невязку баланса к коммерческим потерям, что в конечном итоге негативно отражается на потребителе электроэнергии. Полученные в ходе работы результаты полезны

также на стадии проектирования, поскольку уточнение расчета потерь позволит в значительной степени уточнить технико-экономические расчеты.

Статистический подход в повышении эффективности инструментальных энергообследований может сыграть важную роль. Как указывалось выше, в методах расчета нагрузочных потерь в электроэнергетической системе в целом, необходимо проводить большое количество контрольных замеров. В такой ситуации полезно использовать так называемый «Закон больших чисел», согласно которому, при достаточно большом количестве независимых наблюдений случайной величины среднее арифметическое их значений сходится по вероятности к математическому ожиданию этой величины. Это говорит о том, что в ходе увеличения количества наблюдений в силу вступает «Закон больших чисел», и по характеристике сходимости можно узнать достаточное количество присоединений, подлежащих измерениям, и сколько процентов электроэнергии теряется в целом по системе.

Цель работы – рассчитать добавочные потери энергии в электрических сетях 110 кВ «Ростовэнерго» и «Бурятэнерго» по имеющимся в наличии инструментальным данным и на основе этих расчетов получить характеристику их статистической сходимости.

Из всей совокупности потерь активной мощности и энергии выделяются основные потери, определяемые токами основной частоты:

$$\Delta P_{(1)} = \sum_{i=1}^m r_{i(1)} \int_0^l I_{i,1(1)}^2(x) dx \quad (1)$$

и токами прямой последовательности основной частоты:

$$\Delta P_{1(1)} = \sum_{i=1}^m r_{i(1)} \int_0^l I_{i,1,1(1)}^2(x) dx \quad (2)$$

Добавочные потери от несимметрии токов основной частоты определяются как разность между потерями от токов основной частоты и потерями от токов прямой последовательности основной частоты:

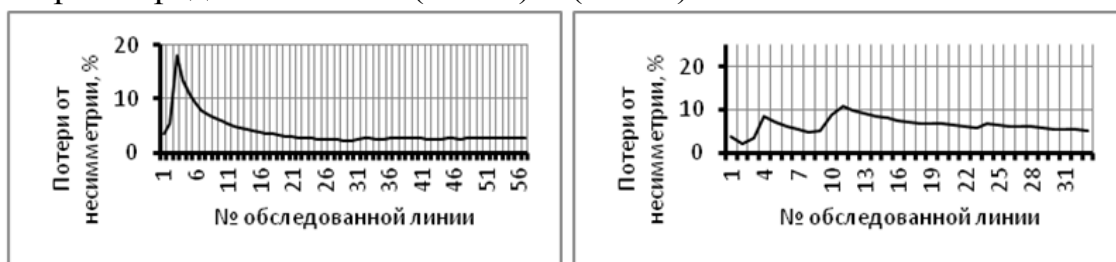
$$\Delta P_{\text{доб. несимм.}} = \Delta P_{(1)} - \Delta P_{1(1)} \quad (3)$$

Добавочные потери от несинусоидальности токов определяются как разность между суммарными потерями активной мощности и потерями, определяемыми токами основной частоты:

$$\Delta P_{\text{доб. несин.}} = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{(1)} \quad (4)$$

Данной работе предшествовал большой объем инструментальных обследований электрических сетей 110 кВ «Бурятэнерго» и «Ростовэнерго» (в «Бурятэнерго» было обследовано 33 присоединений, в «Ростовэнерго» - 57), в ходе которых случайным образом были выбраны подстанции для проведения измерений.

Графики сходимости потерь электроэнергии от несимметрии токов, несинусоидальности токов в линиях «Ростовэнерго» и «Бурятэнерго» представлены на (Рис. 1) и (Рис. 2) соответственно.

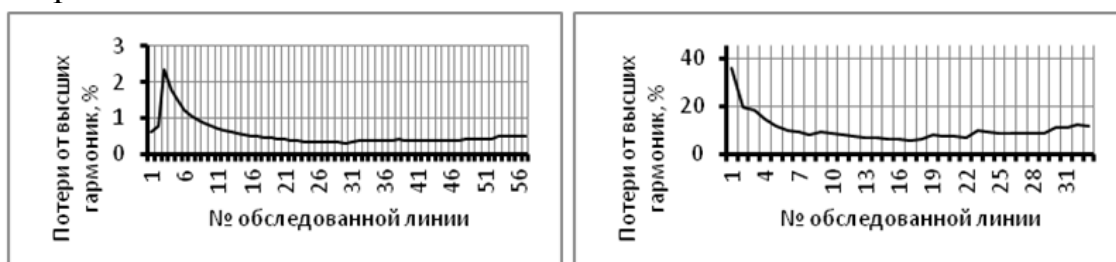


а)

б)

Рис. 1. Сходимость относительной величины потерь электроэнергии от несимметрии токов в % от потерь на основной частоте токов прямой последовательности: а) Ростовэнерго; б) Бурятэнерго;

На (Рис 1, а) видно, что статистическая устойчивость потерь от несимметрии в энергосистеме Ростова начинается приблизительно после наблюдения 20-ой линии. Справа, на (Рис. 1, б), изображен тот же процесс сходимости для энергосистемы Бурятии, в которой колебания средних значений потерь уменьшаются также примерно после 20-го наблюдения. Вместе с тем, следует отметить, что потери от несимметрии в Ростовэнерго в период относительной устойчивости все же колеблются в интервале 2,25 – 2,84 %, что меньше чем в Бурятэнерго, где данный показатель находится в интервале от 5,14 до 6,71 %. Это говорит о степени несимметрии токов в двух энергосистемах.



а)

б)

Рис. 2. Сходимость относительной величины потерь электроэнергии от несинусоидальности токов в % от потерь на основной частоте токов прямой последовательности: а) Ростовэнерго; б) Бурятэнерго;

На левом графике (Рис. 2) видно, как в Ростовэнерго после 30-го наблюдения по мере накопления данных амплитуды математических ожиданий потерь электроэнергии от несимметрии токов продолжают незначительно изменяться в сторону увеличения (0,30 – 0,49 %). Данный показатель изменяется аналогичным образом и в Бурятэнерго, но только после 17-ой обследованной линии (5,74 – 11,98 %). Отсюда следует, что полученные величины потерь от несимметрии будут изменяться, если продолжить экспериментальные наблюдения. Следовательно, нет уверенности в достаточности количества наблюдений для положительных выводов о ее сходимости.

Добавочные потери от несимметрии не велики, но тем не менее значительно превышают потери от высших гармоник. Это объясняется большим количеством линий с тяговыми нагрузками в Ростовском регионе. Очевидно, что из-за относительно низких потерь от высших гармоник суммарные добавочные потери незначительно превышают добавочные потери от несимметрии.

Добавочные потери в Бурятэнерго, вызванные низким качеством электроэнергии по показателю несимметрии и несинусоидальности соизмеримы и в сумме, если принять сходимость с 13 наблюдения, колеблются в диапазоне от 12,86 до 17,26 % от потерь при симметричной системе токов. Это говорит о наличии в сетях и несинусоидальности, и несимметрии.

На (Рис. 3) можно увидеть три составляющие потерь электрической энергии в энергосистемах Ростова и Бурятии. В первой колонке указаны потери от симметричной системе токов, во втором и третьем – от несинусоидальности и несимметрии токов соответственно.

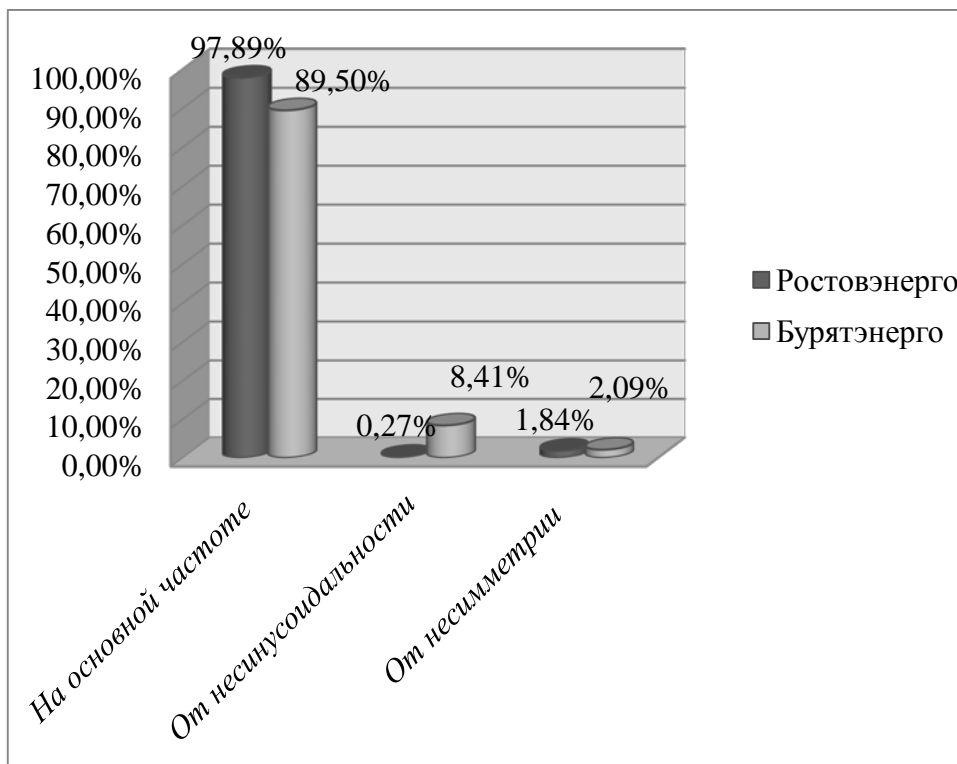


Рис. 3. Состав суммарных потерь активной мощности энергосистемах

**Выводы:**

1. Действующая в настоящее время инструкция по расчету технологических потерь электроэнергии не учитывает добавочные потери от несимметрии и несинусоидальности токов и, следовательно, дает заниженные значения.
2. Оценка уровня величины добавочных потерь от высших гармонических составляющих и несимметрии тока может быть достигнута путем исследования около 25 присоединений энергосистем.
3. Необходимо разработать и утвердить в установленном порядке методики расчета добавочных потерь электрической энергии от действия высших гармонических составляющих тока и несимметрии для каждой энергосистемы и включить ее в расчет технологических потерь электрической энергии.

Авторы благодарят инженеров Регионального центра ресурсосбережения ЭНИН ТПУ Волкова М.В. и Боровикова В.С. за предоставленные данные.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.:Стандартинформ,2012.
2. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326. [www.complexdoc.ru](http://www.complexdoc.ru).

Научный руководитель: Н.Н. Харлов, к.т.н., доцент, ведущий инженер Регионального учебно-научно-технологического центра ресурсосбережения ТПУ

## **МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Е.А. Калинина, В.В. Черепанов  
Вятский государственный университет

Источниками резкопеременных нагрузок в системах электроснабжения являются мощные электроприемники с резкопеременным графиком потребления мощности. Скачкообразное изменение нагрузки вызывают также включения мощных электродвигателей с большой кратностью пускового тока [1].

При работе потребителей с резкопеременной нагрузкой проявляется снижение качества электроэнергии в виде колебаний и отклонений напряжения, а при малой мощности источников питания – колебаний частоты.

При наличии резкопеременных нагрузок наиболее заметное снижение качества электроэнергии проявляется в виде колебаний напряжений. Колебания напряжения возникают в результате быстрого изменения потерь напряжения в элементах сети при резком изменении передаваемых по ним активной и реактивной мощностей. Возникая в какой-либо точке колебания напряжения распространяются по системе. При этом распространение колебаний напряжения к шинам низшего напряжения подстанций происходит практически без затухания, а к шинам высшего напряжения – с затуханием по амплитуде. Появление колебаний напряжения в системах электроснабжения отрицательно сказывается на работе чувствительных к ним электроприемников и, в первую очередь, на работу установок электрического освещения.

С целью разработки рекомендаций о допустимости совместного питания производственных потребителей и источников колебаний, были выполнены экспериментальные исследования режимов электропотребления резкопеременных нагрузок на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанции. Также была поставлена задача изучить влияние резкопеременной нагрузки характерных производств и отдельных электроприемников на параметры качества электроэнергии в различных точках электрической сети.

Исследование режимов электропотребления производилось с использованием переносного анализатора электропотребления AR.5 фирмы Circutor, а также прибором РЕСУРС UF2M.

В качестве примера ниже представлены результаты исследований, проводимых при работе оборудования с резкопеременным графиком нагрузки.

К рассмотрению принимается трансформаторная подстанция с трансформаторами ТМ 250 кВА. Измерения проводились в течение суток. Измерительные приборы устанавливались на шинах подстанции и на отходящем фидере. От этого фидера питается оборудование с резкопеременным графиком нагрузки, питание осуществляется кабелем ААВГ 4х16 протяженностью 30 метров. Помимо оборудования с резкопеременным характером нагрузки от данной подстанции питаются и другие производственные потребители (потребители со спокойным характером нагрузки). Кроме того, в перспективе по существующей схеме необходимо будет подключить электроприёмник с резкопеременным характером нагрузки – козловой кран марки ККС-10 мощностью 42 кВт. Кран подключается к фидеру. При этом необходимо обосновать возможность совместного питания дополнительно подключаемого оборудования с производственной нагрузкой, производя расчёт колебаний напряжения.

На рисунке 1 приводится график изменения напряжения на вводе.

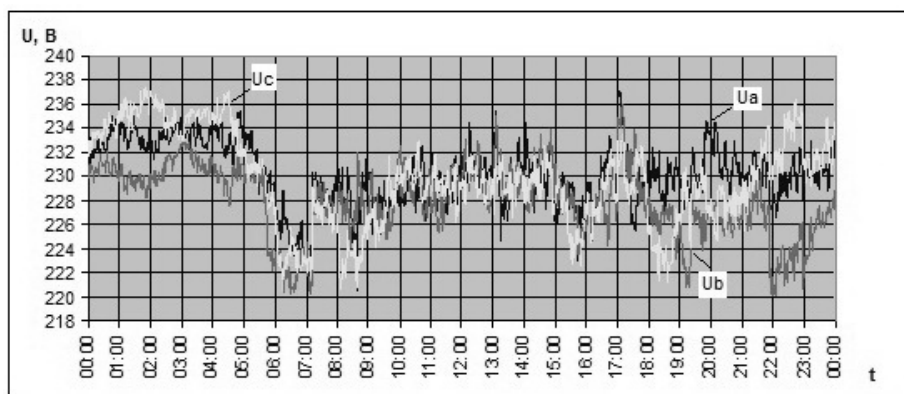


Рис. 1. График изменения напряжения на вводе



Для обоснования возможности совместного питания оборудования с резкопеременным графиком нагрузки совместно с производственными потребителями был произведен расчет колебаний напряжений, создаваемых при работе резко-переменных нагрузок фидера.

Колебания напряжения характеризуется размахом амплитуды и частотой возникновения колебания. В качестве примера приводится гистограмма размахов изменения напряжения (рисунок 2), возникающих при работе оборудования с резкопеременным характером нагрузки (пример для фазы а).

При проведении измерений нормы ГОСТ 13.109-97 по размаху изменения напряжения выполняются.

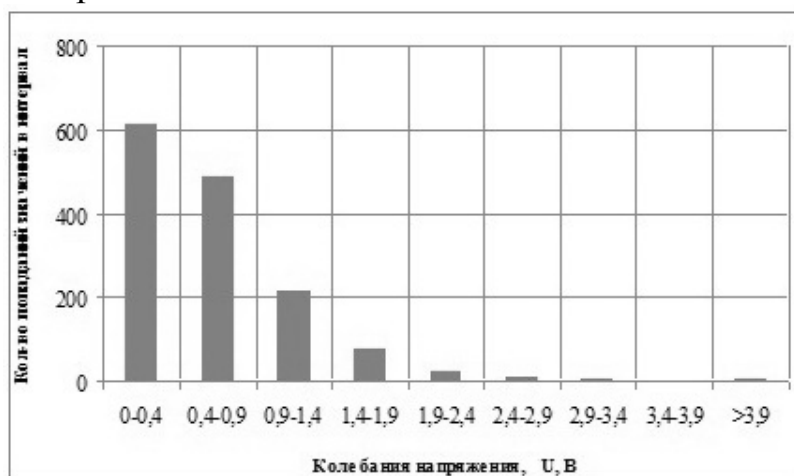


Рис. 2. Гистограмма размахов изменения напряжения на фидере, возникающих при работе лесопильного оборудования (для фазы А)

Для определения колебаний напряжения, возникающих при подключении нового оборудования (рассматривается кран ККС-10), а также для обоснования возможности совместного питания дополнительно подключаемого оборудования производственных потребителей созданы расчетная модель работы крана и расчетная модель совместной работы существующего оборудования с резкопеременной нагрузкой и крана [2]. Результаты расчета режимов электропотребления представлены на рисунке 3.

Как следует из проведенных расчетов нормы ГОСТ 13.109-97 по размаху изменения напряжения выполняются.

Таким образом, при помощи разработанных математических моделей были определены значения колебаний напряжения при подключении нового оборудования (кран ККС-10) и сделан вывод о возможности совместного питания резкопеременной нагрузки с производственными потребителями.

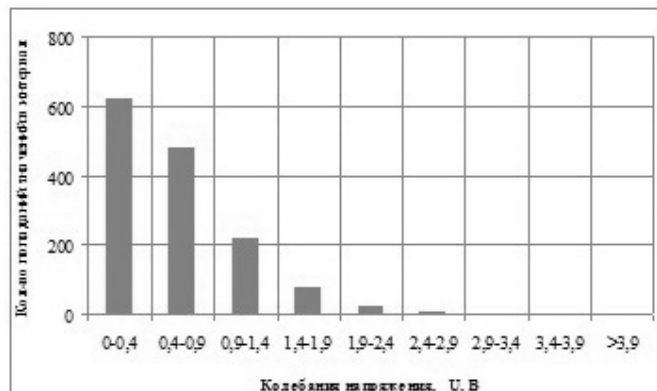


Рис. 3. Гистограмма размахов изменения напряжения, возникающих при работе крана ККС-10 (для фазы А), фидер №7

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

При помощи созданных расчетных моделей произведен расчет колебаний напряжения в точке общего присоединения, возникающих при работе потребителей с резкопеременной нагрузкой. В результате расчетов установлено, что нормы ГОСТ 13.109-97 по размаху изменения напряжения выполняются.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бессолицын А.В., Бакшаева Н.С., Вотинцев А.В., Калинина Е.А. Экспериментальные исследования резкопеременной нагрузки на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции, питающей источник колебаний и коммунально-бытовые потребители. // Энергобезопасность и энергосбережение. Издание Московского института Энергобезопасности и энергосбережения. № 6-2012. Москва. С.40-45.
2. Бессолицын А.В., Бакшаева Н.С., Вотинцев А.В., Калинина Е.А. Влияние силового оборудования на изменение колебаний напряжения в системе электроснабжения. // Перспективы науки. №11(38). Издание Межрегиональная общественная организация и Фонд развития науки и культуры. г.Тамбов, 2012 г., С.109-117.

Научный руководитель: В.В. Черепанов, д.т.н., профессор кафедры Электроснабжения Электротехнического факультета Вятского государственного университета.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СХЕМЫ ПРИ ОЦЕНКЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА

Н.Ш. Чемборисова, К.А.Лысова, А.Е. Суркова  
Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический университет

Из [1] известно, что большое сопротивление сетевых элементов и передача реактивной мощности по сети приводят к повышенным потерям напряжения  $\Delta U$

$$\Delta U = \sum \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}, \quad (1)$$

и активной мощности  $\Delta P$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R. \quad (2)$$

Здесь  $P$  и  $Q$  – соответственно передаваемые по сетевому элементу активная и реактивная мощности;

$R$  и  $X$  – соответственно активная и реактивная составляющие сопротивления сетевого элемента;

$U$  – номинальное значение напряжения.

В связи с этим одним из возможных вариантов управления напряжением и снижения потерь активной мощности в сети является установка конденсаторных батарей у потребителей.

Одна из задач оптимизации режима электрической сети состоит в минимизации потерь активной мощности в сети. Наличие в современных электрических системах кольцевых и сложноразветвленных схем соединения, большого количества имеющих различные параметры трансформаторов, воздушных и кабельных линий электропередачи приводит к возникновению неоднородности схем, поэтому интерес представляет сопоставление некоторых параметров установившихся режимов с оценкой степени неоднородности узлов сети при оптимизации режима.

Степень неоднородности сети можно оценить, используя понятие жесткости узлов и их сенсорности [2]. Жестким считается узел, при изменении нагрузки которого на единицу напряжение изменяется меньше всего, поэтому изменение реактивной мощности в жестком узле для изменения напряжения в узлах или  $\Delta P$  в сети будет наименее эффективным и далее жесткие узлы не рассматриваются. Узел с противоположными свойствами считается сенсорным. Управление режимом будет наиболее эффективным при размещении управляющего воздействия в наиболее сенсорных узлах [3]. Оценить жесткость от-

дельных узлов можно, используя для каждого узла значения разности ( $\Delta G + j\Delta B$ ) собственных и суммы взаимных проводимостей из матрицы узловых проводимостей, обычно используемой при расчете установившегося режима. Для примера рассматривалась схема (рисунок 1), результаты оценки отдельно для  $\Delta G$  и  $\Delta B$  в которой приведены в таблице 1. При анализе  $\Delta B$  видно, что наиболее сенсорным будет узел 6.

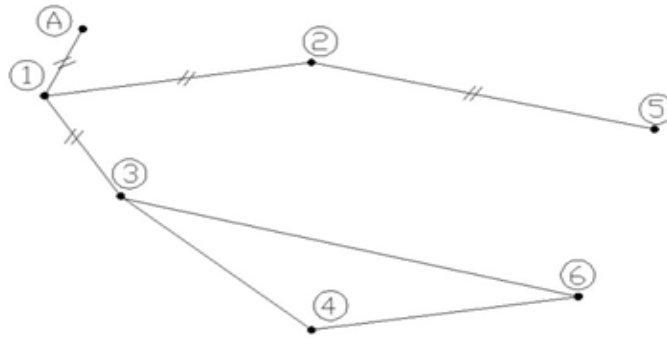


Рисунок 1. Схема сети

Таблица 1. Результаты оценки жесткости узлов для схемы рис.1.

N узла	$Q_{нб}$ , Мвар	$\Delta B$ , См	$\Delta G$ , См
1	2,72	0,11	0
2	5,83	0,17	0,001
5	7,86	-0,001	0,001
3	11,57	-0,003	0,001
4	8,08	-0,019	0,0016
6	12,151	-0,034	0,0024

При П-образной схеме замещения сетевых элементов, положительное значение  $\Delta B$  указывает на большую емкостную составляющую, а отрицательное – на индуктивную. Для радиального участка схемы регулирование напряжения лучше проводить в сенсорном узле 5, для кольцевого участка схемы, включающего узлы 3,4,6, в узле 6.

Задачи оптимизации режима должны решаться только в области допустимых режимов, поэтому следует оценить как повлияет сенсорность узлов на коэффициенты запаса статической устойчивости. Для этого необходимо сопоставить значения реактивных мощностей при утяжелении режима в наиболее сенсорных узлах 4 и 6. Результаты расчетов утяжеления показывают, что для снижения напряжения на 0,41 кВ в узле 6 необходимо увеличить реактивную мощность на 3,03 Мвар, в узле 4 – на 2,56 Мвар, а в более жестком узле 2 – на 1,92 Мвар. Такие данные подтверждают большую сенсорность узлов 6 и 4, большую жесткость узла 2. Тогда для поддержания напряжения эффективнее всего начинать управление с наиболее сенсорных узлов, а

заканчивать наиболее жесткими. Более того, определение коэффициентов запаса по напряжению следует осуществлять по той же схеме, так как при равных значениях утяжеляемого параметра большую посадку напряжения следует ожидать в сенсорных узлах.

По активной составляющей  $\Delta G$  можно сделать дополнительный вывод, касающийся кольцевого участка сети. Снижение потерь активной мощности  $\Delta P$  более эффективно в узлах с большей неоднородностью (по  $\Delta G$ ) 4 и 6. Для проверки этого положения методом динамического программирования проведена оптимизация режима для рассматриваемой схемы. Для наглядности анализируются результаты расчетов для кольцевого участка сети, которые приведены в таблице 2. Для снижения потерь в сети установлены по 8 конденсаторов. В столбце «Установлено конденсаторов» первыми показаны номера узлов, в которых установлены конденсаторы, а затем их количество. Базовое значение активных потерь  $\Delta P$  составляет 2,214 МВт. Оптимальное значение  $\Delta P$  приведено в столбце «Оптим. $\Delta P$ ». В столбце  $\Delta(\Delta P)$  приведена разность между базовым и оптимальным значением активных потерь в сети в % относительно базового значения.

Таблица 2. Оптимизация режима для кольцевой части сети

№ узла	Установлено конденсаторов	$\Delta P_{\text{опт}}$	$\Delta(\Delta P)$	$\Delta G$
Размерность		МВт	%	См
3	1-2:2, 3:6	2,115	4,5	0,001
4	1-3:2, 4:6	2,094	5,42	0,0016
6	1-5:2, 6:6	2,051	6,91	0,0024

Как следует из таблицы 2, наиболее эффективным оказалось снижение потерь в сети при установке наибольшего количества конденсаторов в узле 6, который характеризуется наибольшей неоднородностью. Наименее эффективным вариантом была установка батареи в узле 3 с наименьшей неоднородностью, промежуточным является вариант с установкой конденсаторов в узле 4.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Веников В.А., Строев В.А. Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
2. Савоськин Н.Е. Надежность электрических систем: Учебное пособие. Пенза: Пензенский Государственный Университет, 2004. 102 с.
3. Лопатин О.А., Чемборисова Н.Ш. Использование параметров сети и обобщенных показателей режима для расстановки

компенсирующих устройств //Электричество, №3, 2011, С. 10-12

Научный руководитель: Н.Ш. Чемборисова, д.т.н., профессор кафедры Электроэнергетических систем НИУ МЭИ.

## **ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕСИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ УСТРОЙСТВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин

Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина

В настоящее время в энергосистемах по всему миру продолжается установка устройств синхронизированных векторных измерений – PMU (Phasor Measurement Units) [1]. Эти устройства объединяются в системы глобального мониторинга электрических сетей в режиме реального времени WAMS (Wide Area Measurement Systems). Устройство PMU получает аналоговые сигналы от вторичных обмоток трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), а также сигнал точного времени от системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System), благодаря чему измерения в географически удалённых точках энергосистемы оказываются синхронизированными. Наиболее полно идеология синхронизированных векторных измерений отражена в работе [2], написанной авторами, являющимися одними из основателей данной технологии.

Одним из перспективных направлений применения устройств PMU является определение актуального состояния контролируемого объекта энергосистемы, например, воздушной линии электропередачи (ВЛЭП). Известно, что продольные и поперечные параметры ВЛЭП могут изменяться в довольно широких пределах, прежде всего, в зависимости от атмосферных условий [3]. В результате параметры, рассчитанные на основе традиционных подходов (т.е. некоторых усреднённых данных о геометрии ВЛЭП и физических свойствах проводников), могут совершенно не отражать действительности. При практической реализации предложенных авторами алгоритмов [4,5], направленных на идентификацию параметров ВЛЭП в реальном времени, основную сложность представляет учёт ошибок измерений. Поэтому *целью настоящего исследования является* выяснение статистических свойств несистематической ошибки, оказывающей наибо-

лее деструктивное влияние на результаты выполнения оптимизационных алгоритмов, подобных описанному в [5]. **Методом исследования является** математическое моделирование с использованием большого массива данных, полученных от устройств РМУ, установленных на реальных энергообъектах.

Вектор тока или напряжения, вычисленный устройством РМУ, можно представить следующей моделью:

$$A_{noisy} = A_{true} \cdot K + e, \quad (1)$$

где  $A_{true}$  – истинное комплексное значение тока или напряжения (всегда неизвестная величина);  $K$  – коэффициент коррекции (близкий к единице), учитывающий систематическую ошибку, сопровождающую каждое измерение;  $e$  – несистематическая (случайная) ошибка, или «шум»;  $A_{noisy}$  – комплексная величина, рассчитанная устройством РМУ.

Все параметры в выражении (1) комплексные, т.е. состоят из действительной и мнимой частей (вследствие наличия ошибок как по амплитуде, так и по фазе). Коэффициент коррекции  $K$  учитывает, прежде всего, погрешности ТТ и ТН (вплоть до нескольких процентов). Эти погрешности неизвестны, однако в нормальном режиме работы, характеризуемом малыми изменениями токов и напряжений на ВЛЭП, их можно считать примерно постоянными, иначе говоря – систематическими. Данное обстоятельство позволяет нам учесть их в модели, направленной на идентификацию актуальных параметров ВЛЭП, как дополнительные неизвестные. В отличие от систематических ошибок, величина параметра  $e$  в (1) может постоянно изменяться, в т.ч. и по знаку, при каждом новом измерении.

Можно выделить следующие возможные источники несистематической ошибки, или «шума» измерений:

1. аналого-цифровые преобразователи устройств РМУ;
2. погрешности синхронизации;
3. тот факт, что систематические ошибки ТТ и ТН, учитываемые коэффициентом  $K$  в (1), не являются «идеальными». Они достаточно стабильны в установившемся режиме, но, например, амплитудная ошибка ТТ, равная 1,7%, может варьироваться от измерения к измерению и составлять 1,68%, 1,72% или 1,75%;
4. различные источники «шума» на подстанции, связанные с кабельной разводкой и возможными состыковками, и др.

Поскольку существует достаточно много независимых (или слабо зависимых) источников «шума», можно считать, что несистемати-

ческая ошибка подчиняется закону нормального распределения. Подобное заявление обосновывается центральной предельной теоремой [6]. Отдельные (элементарные) ошибки, слагающие общую случайную ошибку, при этом могут быть подчинены другим законам распределения.

Параметры, входящие в выражение для плотности вероятности, характеризующей нормальный закон распределения, известны: это математическое ожидание  $\mu$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  (или дисперсия  $\sigma^2$ ). Математическое ожидание при большом числе измерений, очевидно, стремится к нулю: все «смещённые» ошибки уже учтены в коэффициенте коррекции  $K$ . Среднее квадратическое отклонение, однако, неизвестно и, более того, уникально для определённой комбинации оборудования на конкретной подстанции. Вместе с тем оно является ключевой характеристикой, отражающей степень точности измерений.

Выполненные авторами теоретические изыскания (выходящие за рамки данной публикации) привели к следующему выводу:

$$\sigma(e) < \frac{\sigma(\Delta A_{noisy})}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

что означает, что среднее квадратическое отклонение несистематической ошибки, хотя и не может быть точно «вычленено» из полученных данных, не превышает среднего квадратического отклонения изменений сигнала (тока или напряжения), разделённого на корень из двух. При этом учитываются только те изменения сигнала от точки к точке, где нечётное измерение вычитается из чётного, т.е. 1-е из 2-го, 3-е из 4-го, и т.д.

Полученные теоретические результаты были апробированы на нескольких ВЛЭП классом напряжения 345 кВ с использованием данных от устройств PMU, предоставленных специалистами American Transmission Company (США). Особый интерес представляют ВЛЭП, где с двух концов установлены различные виды устройств PMU: с одной стороны – цифровой регистратор повреждений (DFR – Digital Fault Recorder) с функцией синхронизированных векторных измерений, а с другой – терминал защиты и автоматики с той же функцией. Для одной из таких ВЛЭП были получены следующие оценки максимальной величины среднего квадратического отклонения несистематической ошибки для токовых сигналов:

- для действительных частей токов с той стороны, где функция PMU заложена в DFR, в среднем для фаз А, В и С: 0,337 А; для мнимых частей: 0,341 А;



- для действительных частей токов с той стороны, где функция PMU представлена в терминале защиты и автоматики, в среднем для фаз А, В и С: 0,143 А; для мнимых частей: 0,135 А.

Подобная разница в оценке максимального значения ошибки, сопровождающей измерения в начале и конце ЛЭП, объясняется, прежде всего, различным форматом хранения данных: либо 16-битные целые числа (DFR), либо 32-битные числа с плавающей точкой (терминал защиты и автоматики).

Полученные оценки значения несистематической ошибки, сопровождающей измерения комплексных значений всех токов и напряжений по концам различных ВЛЭП, представляют очень ценную информацию для тестирования алгоритмов автоматической идентификации актуальных параметров ВЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai, and V. Terzija, "Measurements get together," IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES, pp. 15-23.
2. A.G. Phadke and J.S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008.
3. Иванов И.Е. К проблеме определения актуальных параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи // <http://research-journal.org/>: Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://research-journal.org/featured/k-probleme-opredeleniya-aktualnykh-parametrov-vysokovoltnyx-vozdushnykh-linij-elektroperedachi/> (04.03.2013).
4. Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Определение актуальных параметров воздушных ЛЭП по данным двустороннего замера токов и напряжений : тез. докл. VII Региональной науч.-техн. конф. «Энергия-2012», 17-19 апреля 2012 г. – Иваново, ИГЭУ, 2012. – С. 102-106.
5. Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Разработка алгоритма идентификации актуальных параметров одноцепных нетранспонированных линий электропередачи на основе технологии синхронизированных векторных измерений : ВЕСТНИК Россий-

ского национального комитета СИГРЭ // Специальный выпуск № 1. – Иваново, ИГЭУ, 2013. – С. 325-329.

6. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – 4-е изд., стереотипное. – М.: Наука, 1969. – 576 с. : ил.

Научный руководитель: А.Ю. Мурзин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Электрических систем Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

## **АПРОБИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОИСКА ОПАСНЫХ СЕЧЕНИЙ И МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ ПО НИМ НА ПРИМЕРЕ ТРЕНИРОВОЧНОЙ СХЕМЫ**

А.А. Крадецкая

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2Г

Для решения задач оперативно-диспетчерского управления режимами энергосистем (ЭС) необходимой информацией являются ограничения перетоков мощности в соответствии с пропускной способностью электрических сетей. В практике диспетчерского управления допустимые перетоки рассчитываются заранее с помощью традиционных методов и, как правило, определяются величинами, полученными в наиболее неблагоприятных расчетных режимах. Однако для всего многообразия схемно-режимных ситуаций невозможно заранее определить сетевые ограничения, в связи с чем возникла необходимость выявления в структуре системообразующей сети опасных сечений (ОС) и максимально допустимых перетоков (МДП) по ним.

Сечение ЭС – совокупность всех сетевых элементов – линий электропередачи (ЛЭП), трансформаторов, связывающих между собой две части ЭС или электростанцию с ЭС. В сечения могут попадать как одиночные ЛЭП, так и группы линий и трансформаторов.

Опасное сечение (ОС) – совокупность таких сетевых элементов одной или нескольких связей, отключение которых приводит к полному разделению ЭС на две изолированные части. [1]

Основным критерием выявления опасных сечений ЭС является нарушение ее статической устойчивости либо выход за пределы области статической устойчивости в аварийном режиме. Требование устойчивости является одним из основных требований, предъявляемых к любой технической системе, в том числе к электроэнергетической, и определяет живучесть и работоспособность всей системы. [2]

В настоящее время условно выделяют три основные группы методов, используемых для выявления ОС ЭС:

- методы, базирующиеся на анализе параметров режима;
- методы, использующие для решения задачи поиска ОС анализ матрицы Якоби;
- методы, формирующие опасное сечение по слабым связям, которые характеризуются наличием в них электрического центра качаний (ЭЦК) – традиционный инженерный подход, а также методы, связанные с понятием точки минимального напряжения (ТМН) на линии электропередачи. [3]

Наибольшее распространение среди представленных методов получил метод, основанный на анализе матрицы Якоби, так как он заложен в основу многих программных комплексов (ПК), применяемых для расчета реально существующих ЭС и электрических связей. При анализе матрицы Якоби используется метод эквивалентных преобразований. Генераторы задаются  $PE_q$ -моделью, которая позволяет учитывать взаимосвязь процессов регулирования активной и реактивной мощностей генераторов. При помощи рассматриваемого метода можно реализовать непрерывное утяжеление, что позволяет наиболее точно смоделировать процесс нарушения устойчивости.

Практическая реализация описанного метода возможна при помощи ПК «Поиск ОС», выполненного на платформе ПК RastrWin3 с модулем ТКЗ. Данный программный комплекс предназначен для выявления ОС, МДП по ним и режимов соответствующих ослабленным предельным перетокам в ОС с учетом отказов ЛЭП и действия противоаварийной автоматики.

Апробирование методики поиска ОС и МДП проводилось на примере тренировочной схемы «Тренэнерго», рис.1.

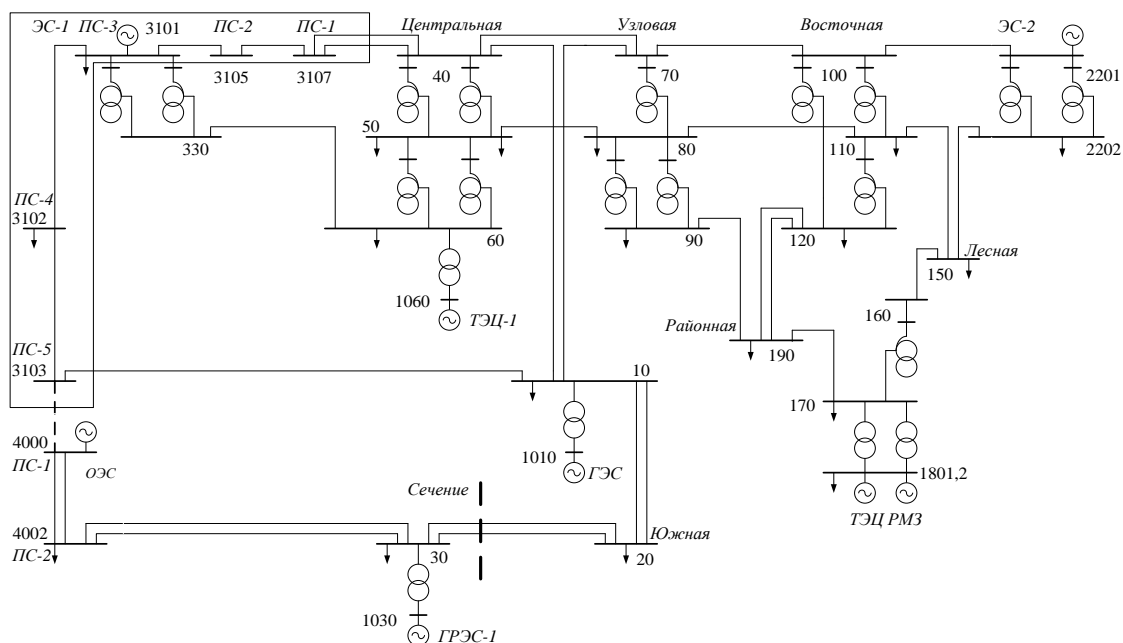


Рис. 1. Расчетная схема «Тренэнерго»

Схема имеет сравнительно небольшой размер и достаточно наглядна, что облегчает последующий анализ результатов. «Тренэнерго» и смежные энергосистемы ЭС1 и ЭС2 входят в состав Объединенной энергосистемы (ОЭС), которая связана с Единой энергосистемой (ЕЭС). Сеть ОЭС, «Тренэнерго» и смежных энергосистем ЭС1 и ЭС2 выполнена на напряжениях 330, 220 и 110кВ. Объединенная энергосистема связана с ЭС1 и «Тренэнерго» линиями 330кВ 3103-4000 и 4002-30. В качестве базисно-балансирующего узла выбран узел 4000 в ОЭС.

Разработанный на базе ПК «Поиск ОС» алгоритм определения ОС можно разбить на три этапа:

1. Получение для исходного режима электрической сети предельного в направлении вектора изменения режима (ВИР).
2. Расчет маркеров ОС для линий основного наблюдаемого фрагмента схемы и формирование из линий ОС.
3. Ослабление полученного режима до допустимого перетока, равного МДП по ОС.

Вектор изменения режима представляет собой набор узлов (объектов сети), которые задают направление изменения режима. Каждый ВИР должен быть сбалансирован по мощности, то есть нагрузочная и генераторная компоненты ВИР должны поддерживаться равными, поэтому для каждой его составляющей задается безразмерный коэффициент участия либо в нагрузке, либо в генерации –  $K_H$  и  $K_G$ . соответственно. Для схемы рисунка 1 были получены следующие коэффициенты составляющих ВИР, табл.1.

Таблица 1. Задание ВИР с помощью коэффициентов

№ узла	Название	$K_H$	$K_G$
4002	ПС-2 ОЭС 330 кВ	0,32	
30	ГРЭС-1 330 кВ	0,12	
1030	ГРЭС-1 15 кВ		0,57
20	ПС Южная 330 кВ	0,36	
10	ГЭС 330 кВ	0,20	
1010	ГЭС 15 кВ		0,43

Следует отметить, что расчет ОС проводился для группы аварийных ситуаций: вывод в ремонт (отключение) ЛЭП ПС-5 (ЭС-1) – ГЭС и ПС-2 (ОЭС) – ГРЭС-1.

В ходе проведения расчетов были получены результаты, отраженные на рисунках 2 и 3.

...	№ ВИР	ранг	N_сеч	Имя	Тип	назв. Аварии	назв. ВИР	P_сеч	P_пред	Ав.Пред	P_энерг	Кол	...	Код А	МДП сеч	АДП сеч
1	2	1	1	4	Найденное ОС	Траектория утяжеления	1 888	2 615	2 521	94	3	2	1 936	2 229		
2	1	1	1	2	Найденное ОС	Траектория утяжеления	1 888	2 628	2 564	95	3	2	1 972	2 269		
3				3	Обычный		3 019									
4				1	Обычный		-2 918									

Рис. 2. Результаты расчета ОС и значения МДП в найденном сечении

..	Имя	N_нач	N_кон	PI	Кдел
1	ПС-5 ЭС-1 330 кВ-ПС-1 ОЭС 330 кВ	3103	4000	-716	
2	ПС Южная 330 кВ-ГРЭС-1 330 кВ	20	30	-1 101	
3	ПС Южная 330 кВ-ГРЭС-1 330 кВ	20	30	-1 101	

Рис. 3. Результаты поиска ОС по ЛЭП

Согласно полученным результатам, в исследуемой схеме наблюдается перегрузка линий 3103-4000 и 20-30, что при возникновении аварийных ситуаций приведет к отделению фрагмента ОЭС от остальной части схемы и, соответственно, к полному разделению рассматриваемой ЭС на две изолированные части.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
2. Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: СТУ, 2005. – 176 с.
3. Курмак В.В. Совершенствование метода выявления и мониторинга опасных сечений электроэнергетической системы. – Автореферат, 2012г. – 20 с.

Научный руководитель: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

## **ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

А.А. Сидоров, А.Е. Сидоров

Казанский государственный энергетический университет

В последнее время все больше внимания уделяется проблемам оптимизации решений, принимаемых в процессе проектирования систем электроснабжения предприятий, организаций и учреждений. Проектирование системы электроснабжения и других сложных систем, в общем случае имеют две стадии: внешнее и внутреннее проектирование, где в подавляющем большинстве случаев доминирует результирующий показатель качества системы электроснабжения. Данный показатель качества системы, как правило, не учитывает реальное состояние уже существующих сетей, их изношенность, режимы работы, характеристики потребителей, гармонические составляющие напряжения и тока.

С целью решения данной проблемы целесообразно провести декомпозицию системы электроснабжения на составные элементы с любым уровнем иерархии. Под элементом  $x_i \in X_{\text{сист}}$  системы в данном случае понимается техническое устройство со своими характеристиками и свойствами, которой обеспечивает выполнение



Рис. 1. Блок-схема решения задачи

какой-то определенной функциональной операции  $\varphi_i$ . Основная задача декомпозиции связана с анализом реальных технических возможностей составных элементов выполнять свои функции, с заданными параметрами качества функционирования системы в целом. При этом на отдельном этапе определяются параметры характеризующие состояние элементов системы электроснабжения на текущий момент времени, которые уже существуют. Определяется их способность выполнять свои функции с заданным качеством.

В ходе решения задачи с учетом состояния существующих элементов системы, их параметров, поэтапно осуществляется расширение формализованного описания модернизируемой системы. Необходимо добавить, что на разных этапах оптимизации модернизируемой системы, критерий качества определяется в соответствии с этапом синтеза.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие для вузов / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. - Минск: Высшая школа, 1988. – 357 с.
2. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М.: Энергия, 1979. - 408 с.

Научный руководитель: К.Н. Мулюкин, к.т.н., доцент КГЭУ.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ЯКОБИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Г.С. Шабалин, А.В. Паздерин, В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Как известно, современный этап развития электроэнергетики характеризуется значительной степенью автоматизации и использованием высокотехнологичных подходов. Актуальным вопросом является определение достоверной области существования режима, направления утяжеления к ближайшей границе, а так же возможности оценки запаса по устойчивости при произвольных параметрах режима [1].

В докладе приводится исследование возможности нахождения кратчайшего расстояния до границы области существования режима из произвольного режима. При этом полагаем, что правильная настройка автоматических регуляторов возбуждения обеспечивает полное совпадение областей существования режима и устойчивости – то есть возможность колебательного нарушения устойчивости исключена. В качестве тестовой схемы используется трехузловая схема классом напряжения 500 кВ. Два узла этой схемы – генераторные (представляют эквивалент энергорайона). Схема рассматриваемой энергосистемы приведена на рисунке 1.

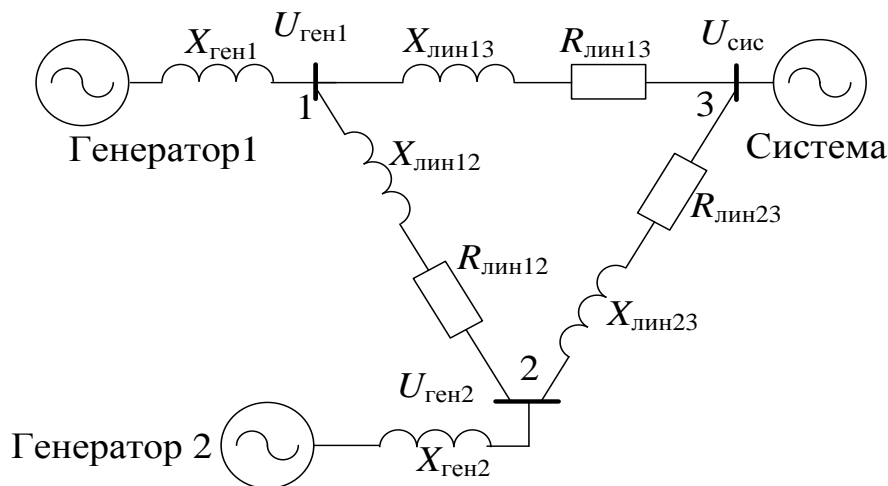


Рис.1. Схема рассматриваемой энергосистемы

Традиционным методом для оценки границы существования режима с точки зрения статической устойчивости является утяжеление, используемое в программных комплексах для расчета установившегося режима. В результате расчета для рассматриваемой энерго-



системы получена граница существования режима, изображенная на рисунке 2.

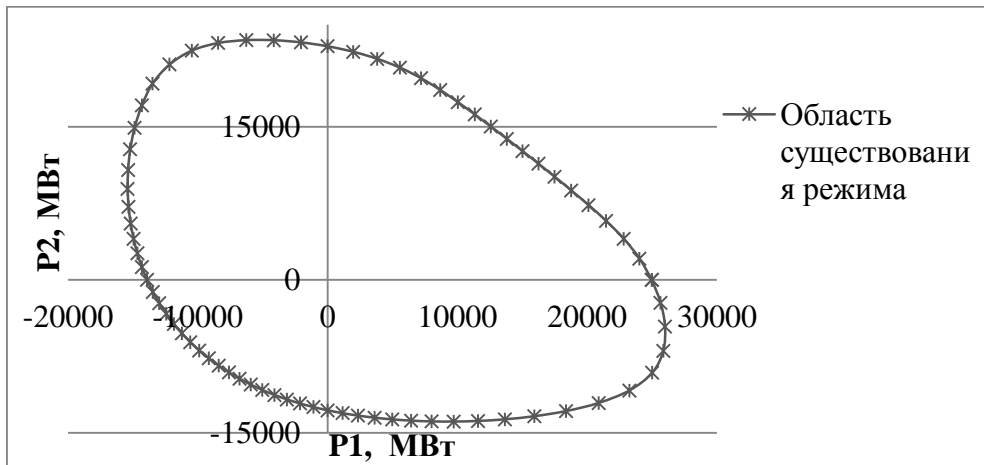


Рис. 2. Область существования режима для тестовой схемы

Как известно, матрица Якоби для произвольной энергосистемы может быть определена в общем виде, тем самым по данным любого режима может быть найдены все его элементы. Для данного исследования в программном комплексе Matlab была реализована функция по получению Якобиана по данным любого произвольного режима.

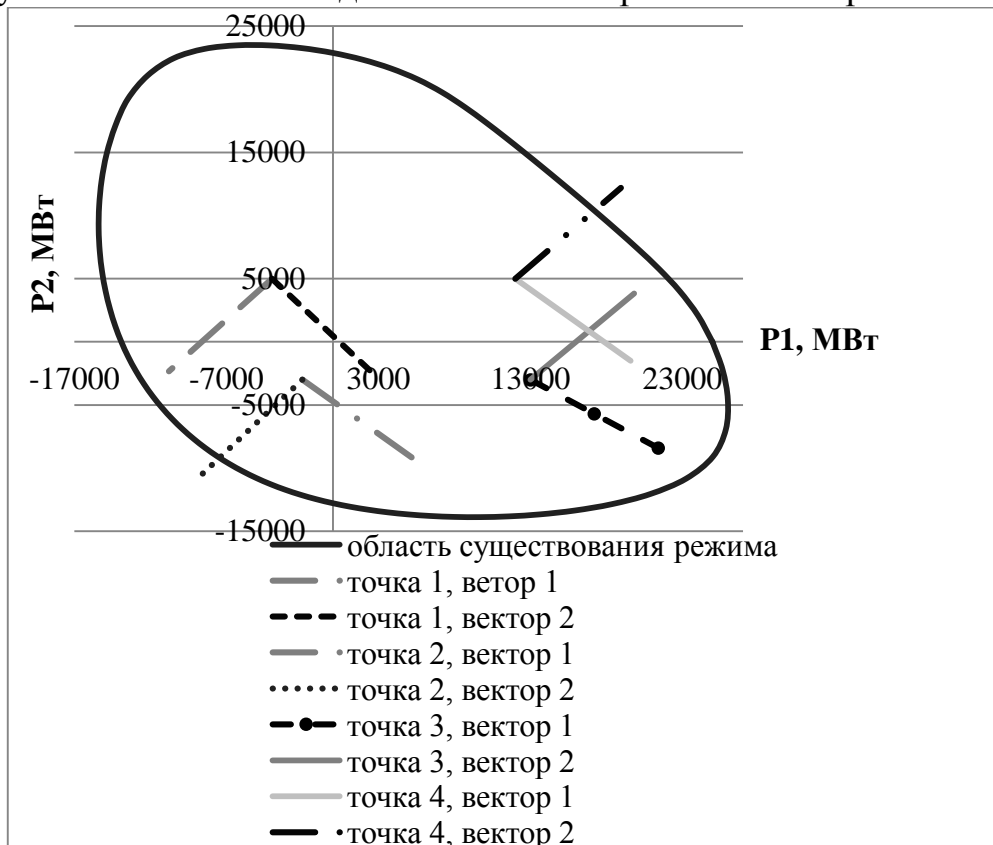


Рис. 3. Правые собственные вектора в различных режимах

Как известно [2], в предельном режиме один из собственных векторов матрицы Якоби всегда будет перпендикулярен к прямой, ап-

проксимирующей границу существования режима. На рисунке 3 приведены правые собственные числа обратной матрицы Якоби в различных четвертях плоскости. Из рисунка видно, что один из правых собственных векторов указывает направление, близкое к кратчайшему расстоянию от точки до границы статической устойчивости. Этот вектор относится к наименьшему собственному числу матрицы Якоби. Из предлагаемых рисунков 3, 4 видно, что даже при значительном удалении от предела по статической устойчивости правый собственный вектор может использоваться для определения направления утяжеления, характеризующего кратчайшее расстояние до области устойчивости. Особенно четко это иллюстрируется рисунком 4, из которого следует, что чем ближе граница, тем правильнее определяет вектор искомое направление утяжеления. Все три точки, в которых получены правые собственные векторы соответствуют одному направлению утяжеления. Таким образом, использование правого собственного вектора обратной матрицы Якоби может значительно упростить определение ближайшей границы области существования режима.

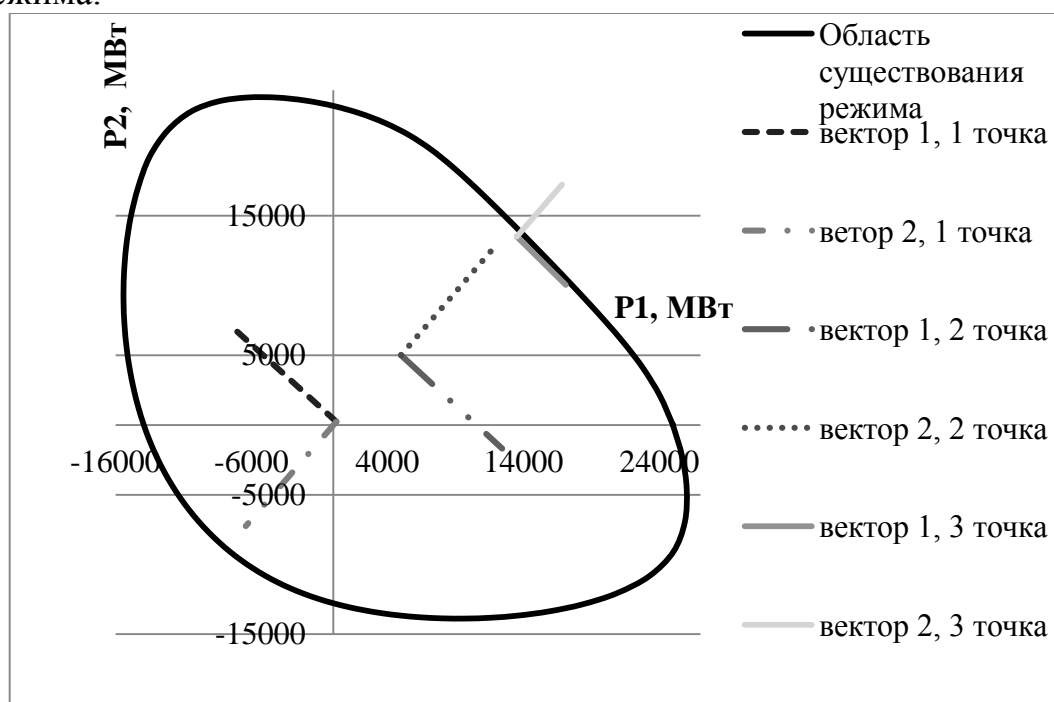


Рис. 4. Правые собственные вектора при одном направлении утяжеления

Комплексное изучение проблемы анализа области существования режима – актуальный вопрос для электроэнергетической отрасли [3]. При ведении режима важным является вопрос достоверного определения реальных коэффициентов запаса. Использование правых собственных векторов для определения наилучшего направления утяже-

ления, а в перспективе для нахождения запаса устойчивости по текущему режиму является перспективным решением проблемы мониторинга устойчивости в реальном времени.

Дальнейшее развитие этой тематики в практическом ключе позволит применять в оперативно-диспетчерском управлении алгоритмы для выявления запасов устойчивости [4]. В перспективе предполагается использование для получения области устойчивости идентифицированной модели, созданной в соответствии с методами, изложенными в [5]. Что позволит в дальнейшем осуществлять оценку реальных запасов по устойчивости в темпе реального времени [6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Андreyuk В.А., Метод локализации собственных значений и критерий статической устойчивости энергосистемы. Электричество, 2006. 4.
2. Конторович А.М., Крюков А.В. Предельные режимы энергосистемы (основы теории и методы расчетов). 1985: Улан-Удэ, ВСТИ, с 74.
3. Жданов П.С., Вопросы устойчивости электрических систем. 1979: М., Энергия. 456.
4. Чусовитин П.В., Паздерин А.В.. Анализ статической устойчивости энергосистемы на основе идентификации динамического эквивалента. Международная научно-техническая конференция: Электроэнергетика глазами молодёжи 2011: Самара. р. С. 210 – 215.
5. Chusovitin P. Transient Prediction and Small-Signal Stability Analysis using PMU-based Power System Identification in IASTED Asian Conference Power and Energy Systems. 2012. Phuket, Thailand.
6. Чусовитин П.В., Паздерин. А.В.. Применение синхронизированных векторных измерений для идентификации динамического эквивалента энергосистемы, Всероссийская научно-техническая конференция: Электроэнергетика глазами молодёжи 2010: Екатеринбург. р. С. 269-274.

Научный руководитель: А.В. Паздерин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АЭС Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОЛУВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Е.Д. Филин

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2Г

В настоящее время для передачи больших мощностей на дальние и сверхдальние расстояния используются линии электропередачи (ЛЭП) высокого и ультравысокого напряжения. Среди таких линий наибольшее распространение получили полуволновые ЛЭП длиной 3000км и волновой длиной  $180^\circ$  ( $\lambda=\pi$ ), так как они, не имея ограничений по передаваемой мощности и характеризуясь сбалансированностью по реактивной мощности, являются наиболее предпочтительным вариантом повышения пропускной способности транзитной передачи электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния.[1]

Для анализа режимов работы идеализированных дальних ЛЭП используется система уравнений [2]:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cos \lambda + j \cdot \underline{I}_2 \cdot Z_B \cdot \sin \lambda; \\ \underline{I}_1 = j \cdot \underline{U}_2 \cdot \frac{1}{Z_B} \cdot \sin \lambda + \underline{I}_2 \cdot \cos \lambda, \end{cases} \quad (1)$$

где

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$  – действующие значения напряжений в начале и в конце линии соответственно;

$\underline{I}_1, \underline{I}_2$  – действующие значения токов в начале и в конце линии соответственно;

$Z_B$  – действующее значение волнового сопротивления линии;

$\lambda$  – волновая длина.

При условии  $l=3000\text{км}$ ,  $\lambda=180^\circ$ ,  $\cos 180=-1$ ,  $\sin 180=0$  уравнения (1) примут вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{U}_2; \\ \underline{I}_1 = -\underline{I}_2, \end{cases} \quad (2)$$

то есть значения напряжений и токов по концам линии в нормальном режиме работы равны по абсолютной величине, но противоположны по направлению. При этом выполняется равенство:

$$\underline{S}_1 = 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1 = 3 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2 = \underline{S}_2 \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) позволяют сделать вывод, что полуволновая ЛЭП по своим свойствам близка к линии с нулевой волновой длиной, которая считается эталонной.

Поскольку середина линии отстоит от конца на волновую длину  $\pi/2$ , то в соответствии с (1) имеем:

$$\underline{U}_{CP} = jZ_B \cdot \underline{I}_2 \quad \underline{I}_{CP} = j\underline{U}_2 / Z_B \quad (4)$$

При работе линии на холостом ходу  $U_{CP}^{XX} = 0$ . При передаче натуральной мощности напряжение в середине линии по величине не отличается от напряжений начала и конца. Ток в средней части линии не зависит от режима и по величине всегда равен натуральному току. Эпюры распределения напряжения и тока вдоль полуволновой ЛЭП в различных режимах представлены на рис. 1.[3]

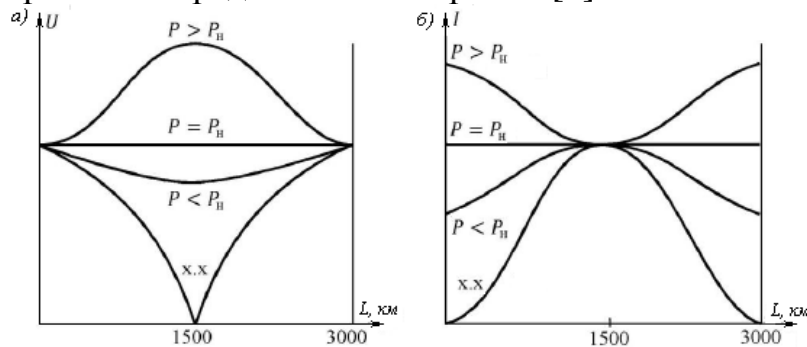


Рис. 1. Распределение напряжения (а) и тока (б) вдоль полуволновой ЛЭП

Для того чтобы убедиться в правильности теоретических выводов о режимах работы полуволновой ЛЭП, необходимо провести ряд экспериментов согласно схеме электрических соединений, представленной на рис. 2. Схема собрана с помощью элементов физической модели, разработанной ООО «Учебная техника» (г. Челябинск).

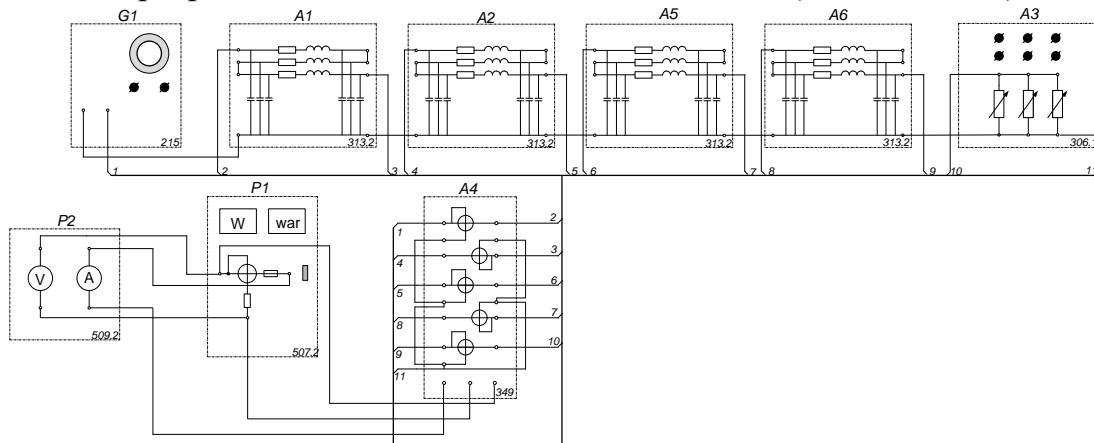


Рис. 2. Схема электрических соединений

На схеме рис. 2:  $G1$  – шины бесконечной мощности (моделирует электрическую систему);  $A1, A2, A5, A6$  – модель полуволновой ЛЭП;  $A3$  – активная нагрузка (моделирует однофазную активную нагрузку в конце длинной ЛЭП);  $A4$  – коммутатор измерителя мощностей (позволяет без переборки схемы производить измерение потоков активной

и реактивной мощностей измерителем  $P1$ );  $P1$  – измеритель мощностей;  $P2$  – блок мультиметров (позволяет одновременно производить измерение тока и напряжения в интересующих точках электрической сети).

При использовании вышеуказанной схемы был проведен ряд экспериментов:

- Эксперимент 1 – Моделирование режима передачи натуральной мощности;
- Эксперимент 2 – Моделирование режима передачи мощности, которая больше натуральной;
- Эксперимент 3 – Моделирование режима передачи мощности, которая меньше натуральной;
- Эксперимент 4 – Моделирование режима холостого хода.

По результатам экспериментов были построены эпюры распределения напряжения и тока вдоль полуволновой ЛЭП, которые показаны на рис. 3 и 4 соответственно.

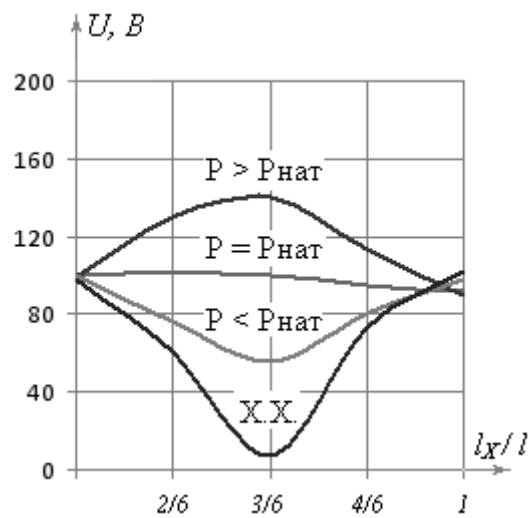


Рис. 3. Распределение напряжения вдоль полуволновой ЛЭП

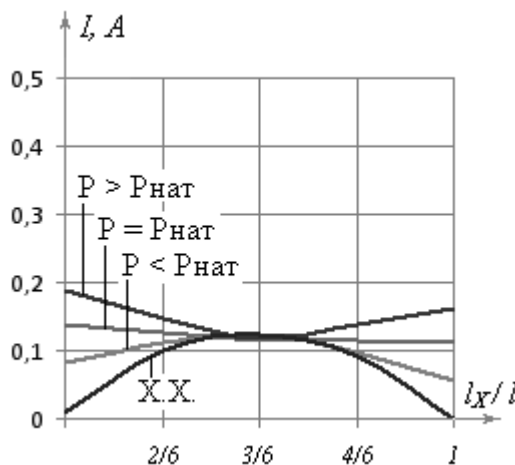


Рис. 4. Распределение тока вдоль полуволновой ЛЭП

Графические зависимости полностью подтвердили теоретические сведения об изменении режимных параметров в различных режимах работы полуволновой ЛЭП, поэтому можно сделать вывод о том, что физическая модель является вполне пригодной для проведения более сложных экспериментов по исследованию режимов дальних электропередач.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кобылин А.В. Повышение надежности и эффективности сверхдальних электропередач полуволнового типа с промежуточным отбором мощности – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Якутск, 2012. - 172 с.
2. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: МЭИ, 2007. - 488 с.: ил.
3. Ананичсва С.С., Бартоломей П.И., Мызин А.Л. Передача электроэнергии на большие расстояния: Учебное пособие; изд. 3-е, исправл. Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 85 с.

Научные руководители: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент кафедры ЭСиЭ, ЭНИН ТПУ; А.В. Панкратов, к.т.н., ассистент кафедры ЭСиЭ, ЭНИН ТПУ.

### **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С КОМПЛЕКСНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТРАНСФОРМАЦИИ В РАСЧЕТАХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ**

Р.Ф. Галиев

Казанский государственный энергетический университет

Современная сложная электроэнергетическая система (ЭЭС) состоит из участков электрических сетей с разными номинальными напряжениями, которые связаны между собой повышающими и понижающими трансформаторами или автотрансформаторами.

При построении математической модели установившегося режима ЭЭС в большинстве случаев необходимо учесть наличие трансформаторов, которые в общем случае характеризуются комплексными коэффициентами трансформации [2].

Однако ничего не отмечается о том, как представить расчетную схему трансформатора и как ее учесть при построении матриц обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации.

Предлагается метод построения и корректировки матрицы проводимостей с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. Этот вопрос является очень важным при решении режимных вопросов электроэнергетических систем.

Предлагаемый метод избавит от трудностей пересчета всех сопротивлений элементов схемы к одному напряжению, а математическая модель позволит автоматизировать и ускорить процесс расчета.

Коэффициент трансформации в общем случае определяется комплексным числом:

$$K_T = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} e^{-i \cdot m \frac{\pi}{6}} \quad (1)$$

Где  $m$  – номер группы соединений обмоток трансформатора, определяющий сдвиг по фазе низкого напряжения в режиме холостого хода [1].

Учет трансформаторов в расчете режимов электроэнергетических систем заключается в преобразовании матрицы соединений (первой матрицы инцидентий), и, как следствие, пересчета матрицы проводимостей.

В ходе исследования была сформирована математическая модель в Mathcad и проведены серии расчетов, которые подтвердили правильность предлагаемого метода.

В качестве примера была рассмотрена схема электрической сети с двумя трансформациями напряжения. Один из трансформаторов обладает комплексным коэффициентом трансформации.

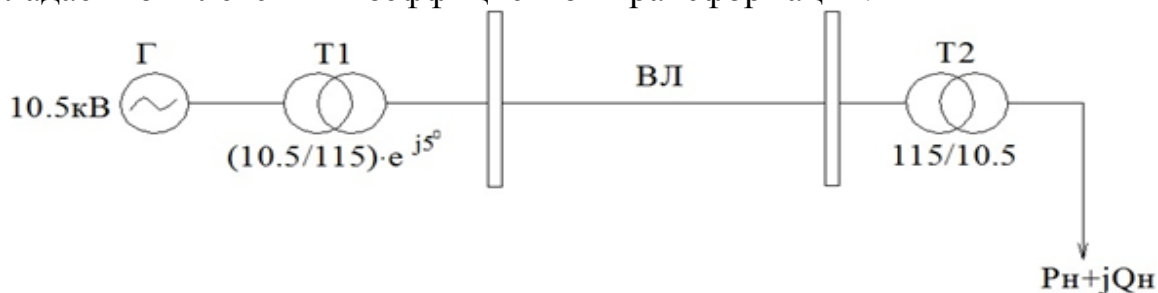


Рис. 1. Схема электрической сети

На основании данной схемы составим расчетную схему замещения.



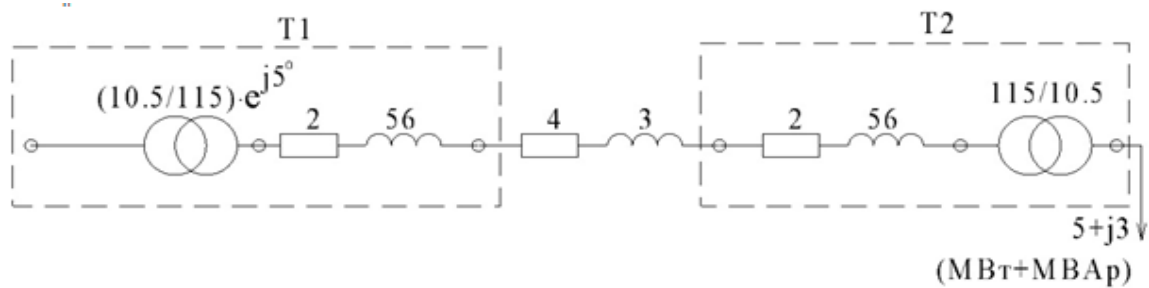


Рис. 2. Схема замещения электрической сети

Пунктиром обведены трансформаторные ветви. Трансформатор моделируется двумя ветвями и тремя узлами.

Первая ветвь (ветвь идеального трансформатора) показывает лишь трансформацию напряжения. Для формирования матрицы проводимостей и чтобы избежать деления на нуль необходимо задать сопротивление такой ветви настолько малым, что оно не повлияет на параметры режима.

При моделировании схемы замещения была применена теория графов.

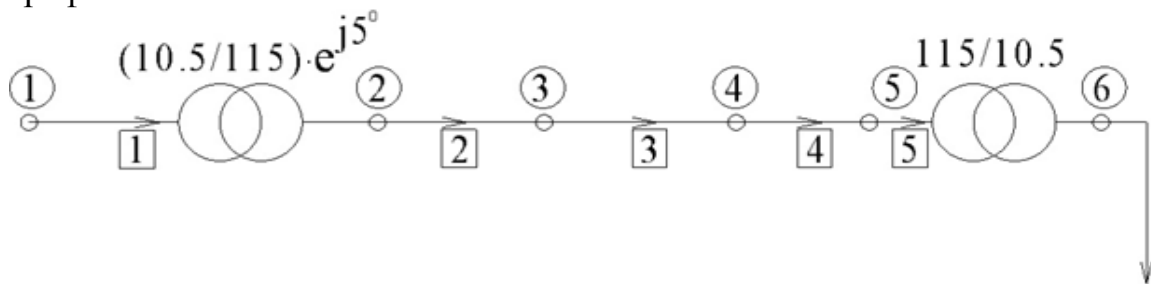


Рис. 3. Граф схемы замещения электрической сети

В инженерных расчетах конфигурация сети задается с помощью матрицы, которая показывает узлы входа и выхода ветвей:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 3 & 4 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \end{bmatrix}$$

Каждая строка матрицы  $L$  это узлы входа и выхода соответствующей ветви (например у первой ветви узел входа 1, а узел выхода 2). Число строк соответствует числу ветвей в схеме.

$$K_T = \begin{bmatrix} \frac{10.5}{115} e^{j5} \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \frac{115}{10.5} \end{bmatrix}$$

```

M :=
  i ← L<1>
  j ← L<2>
  for k ∈ 1..uzlov
    for s ∈ 1..vetvey
      mk,s ←
        1 if k = is
        (-Kt)s if k = js
        0 if k ≠ is ∧ k ≠ js
  m

```

Рис. 4. Код для автоматического формирования матрицы M

Если ветвь выходит из узла, то элементу матрицы присваивается единица.

Если ветвь входит в узел, то элементу матрицы присваивается соответствующее значение из столбца матрицы коэффициентов трансформации, взятое с обратным знаком.

Если ветвь не связана с узлом, то элементу матрицы присваивается ноль.

Таким образом полученная матрица M:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.090957 + i \cdot 0.007958 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10.952381 \end{bmatrix}$$

На основании полученной матрицы формируется матрица узловых проводимостей, которая позволяет перейти непосредственно к расчету параметров режима, используя итерационные методы расчета.

$$Y = M \cdot \text{diag}(Z) \cdot \bar{M} \quad (2)$$

Предлагаемый метод позволяет автоматически формировать матрицу проводимостей, используемую в инженерных расчетах сетей нескольких классов напряжения.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
2. Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Тамразян М.Г., Хачатрян К.В., Мнацакян М.А., Григорян С.Э., Гулян А.Г., Апроян С.А. // Изв. НАН РА и ГИУ Армении. Сер. ТН. – 2008. Т. LXI, №2

Научный руководитель: А.М. Маклецов, к.т.н., профессор кафедр Электротехнические системы и сети Института электротехники и электроники Казанского государственного энергетического университета.

## **ДОПУСТИМЫЕ РАДИУСЫ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОВ ПИТАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Н.Н. Смотров, Г.Ч. Чо  
Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический университет

Распределительные сети во многих регионах России, в течение последних десятилетий, находились в условиях перманентных реорганизаций и отсутствия единой технической политики развития и реконструкции сети. В итоге физический износ основного электротехнического оборудования распределительных сетей достиг 70 %, [1]. Так, в декабре 2010 года, в результате «ледяного дождя», в Московской области, без электроэнергии, остались 320 населенных пунктов, 5805 жилых домов. Данный инцидент является серьезным сигналом о критическом положении дел в сетевом хозяйстве, [2]. В настоящее время до 80 % аварийных отключений потребителей происходит из-за отказов в распределительных сетях, [3]. Ситуацию усугубляет обязанность эксплуатирующих организаций обеспечивать технологические присоединения потребителей, независимо от наличия технической возможности подключения потребителя, [4]. В результате распределительные сети разрастаются хаотично, надежность электроснабжения потребителей часто не соответствует требуемой. Для повышения надежности электроснабжения потребителей требуется, с одной стороны, замена изношенного оборудования на новое, а с другой сторо-

ны, применение обоснованных схемных решений при строительстве и реконструкции объектов сетевого комплекса. Допустимые радиусы действия центров питания распределительных сетей, с учетом надежности электроснабжения потребителей, являются важным критерием при принятии схемных решений реконструируемой или проектируемой сети. В соответствии с [3], рекомендуемый радиус действия сетей 10 кВ, с учетом потерь напряжения, но без учета надежности электроснабжения потребителей, составляет 14,75 км. За рубежом это значение составляет 7 км, [3].

В данной работе произведен расчет допустимых радиусов действия центров питания распределительных сетей напряжением 10 кВ при различных схемах сети с учетом категории надежности электроснабжения потребителей.

В работе рассматривались следующие схемы распределительных сетей:

радиальная схема - электроснабжение осуществляется линиями, не имеющими промежуточных отпаяк, рисунок 1; применяется для электроснабжения потребителей только третьей категории, [5]

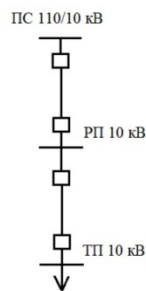


Рис. 1. Радиальная схема электроснабжения

петлевая схема - магистраль с двухсторонним питанием, рисунок 2; применяется для электроснабжения потребителей второй категории и локальных потребителей первой категории, [5];

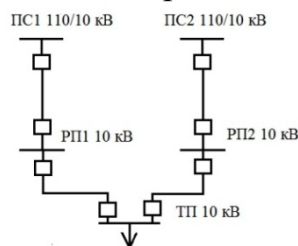


Рис. 2. Петлевая схема электроснабжения

двухлучевая схема - питание каждой трансформаторной подстанции по двум линиям, рисунок 3; применяется для электроснабжения потребителей первой категории, [5].

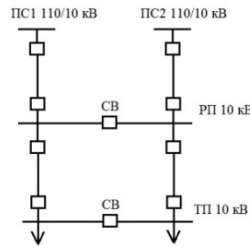


Рис. 3. Двухлучевая схема электроснабжения

При определении допустимых радиусов критерием, выступет надежность электроснабжения в узлах подключения потребителей, выраженная в эквивалентной продолжительности отключения, Тэкв, в часах в год. В соответствии с [6] на шинах 6 (10) кВ потребительских ТП 2 и 3 категории Тэкв. составляет 15 ч в год, для потребителей 1 категории – 1 - 2,5 часа в год.

В расчетах были приняты следующие условия и исходные данные:

- номинальное напряжение распределительной сети 10 кВ;
- параметры надежности линий электропередач, силовых трансформаторов, выключателей приняты в соответствии с, [7];
- шины 10 кВ подстанции центра питания 110/10 кВ имеют абсолютную надежность.

Расчет надежности распределительных сетей производился в программном комплексе NEPLAN.

Методика расчета допустимых радиусов состоит из:

- разработки расчетной модели, в которую входят схемы распределительных сетей с параметрами надежности линий и выключателей;
- $\Omega$  [1/год] – параметр потока отказов и  $Tв$  [ч] – математическое ожидание продолжительности восстановления системы после отказа. Для воздушных линий  $\Omega=7,64$ [1/год],  $Tв=5$ [ч] (на 100 км линии), для выключателей  $\Omega=0,01$ [1/год],  $Tв=20$ [ч] приняты согласно, [7];
- варьирование длин линий электропередач и проведение серии повторных расчетов параметров надежности для определения предельно допустимых длин линий из условия допустимого значения Тэкв для конкретной схемы сети и категории потребителя (см. табл.1).

Таблица 1. Тэкв для конкретной схемы сети и категории

Виды схем	Категория надежности электроснабжения потребителя	Тэкв, ч/год.

Радиальная	3	15
Петлевая	1	5
	2	2,5
	3	15
Двухлучевая	1	5

Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Радиусы действия центров питания

Виды схем	Категория надежности электроснабжения потребителя	Радиусы действия центров питания, км.
Радиальная	3	12,5
Петлевая	1	9
	2	22
	3	30
Двухлучевая	1	25

Результаты отличаются от полученных, в соответствии с [3] так как в представленной работе учитывалась категоричность электроснабжения потребителя.

Так ранее полученные 14,75 километров для радиальной схемы электроснабжения сократились до 12,5 за счет учета показателя надежности линий и выключателей.

На примере люберецкой распределительной сети Московской области радиусы действия центров питания превышают полученные в данной работе значения. Длины линий превышены для потребителей третьей категории питающихся по радиальной схеме в два раза, а для второй категории питающихся по петлевой схеме на 30%.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Новак А.В. Энергетическая безопасность: вызовы и стратегические решения // Журнал Энергополис №7-8(47-48) июль-август 2012 с. 45-56.
2. Анализ деятельности структурных подразделений ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Московской области» за 4 квартал 2010 года // МЧС России мониторинг за 28 декабря 2010 года. – 10 с.
3. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981-224 с.
4. Правила технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объ-

- ектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям. – ФАС России, Опора России, 2009. – 35 с.
5. Шведов Г.В. Городские распределительные электрические сети: схемы и режимы нейтрали. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 105с.
  6. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. Издательство Иркутского Государственного Университета, 1996, 86 с.
  7. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П., Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для Курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов - 4-е изд, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.: ил.

Научный руководитель: Чо Гван Чун, к.т.н., доцент НИУ МЭИ.

## **ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ПРИМОРСКОГО КРАЯ**

О.А. Лозикевич  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС, группа 5АМ23

В современном мире с каждым годом увеличивается потребление электрической энергии в связи, с чем строятся и вводятся в эксплуатацию новые линии электропередачи, новые электростанции. В результате энергосистемы становятся все более сложными объектами, возрастает сложность управления, а, следовательно, и требования к управлению.

В настоящее время, практически повсеместно, все задачи, связанные с установившимися режимами, решаются с вполне приемлемой точностью с помощью профессионального программного комплекса «RASTR». Однако для современных энергосистем все более актуальными становятся задачи, связанные с расчетами электромеханических переходных процессов, которые позволяют обоснованно выбрать место расположения и уставки противоаварийной автоматики, от чего в значительной степени зависит живучесть всей энергосистемы. Данные задачи всегда были актуальны, но только сравнительно недавно появились возможности создания моделей, позволяющих

получить достоверные результаты расчета динамических режимов. Это связано, в частности, с тем, что в последние годы все более широко используются различные средства регистрации параметров электрических режимов, что позволяет верифицировать расчетные математические модели.

Работы по разработке принципов и критериев верификации динамических моделей энергосистем ведутся в ОАО «НИИПТ» [1], ОАО «СО ЕЭС». Можно ожидать, что в ближайшие годы верификация динамических моделей станет обязательным требованием для всех филиалов «СО ЕЭС».

Целью данной работы является создание расчетной динамической модели энергосистемы Приморского края в программном комплексе (ПК) «МУСТАНГ» и ее верификация.

Энергосистема Приморского края входит в операционную зону Филиала ОАО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Приморского края», ее территория составляет около 164,7 тыс. км<sup>2</sup>. Энергосистема Приморского края связана с энергосистемой Хабаровского края (операционной зоны Филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Востока, к которой относится данная энергосистема линиями: одна линия 500 кВ, три линии 220 кВ, одна линия 110 кВ.

Суммарная установленная мощность электростанций энергосистемы составляет 2612 МВт, максимум потребления края составил 2257,9 МВт, 26 декабря 2012 года в 20-00 часов при среднесуточной температуре наружного воздуха -21,1°С, что совпало с проведением саммитом большой восьмерки. На потребление края оказывают влияние крупные потребители (машиностроение, железнодорожный транспорт, предприятия добывающей и химической промышленности), что в совокупности составляет около 20% потребления края. Весьма заметно влияние бытовых потребителей, которое составляет около 21%. Остальная часть потребления относится к другим видам экономической деятельности и собственным нуждам сторонних электростанций и котельных.

Отметим некоторые особенности Приморской энергосистемы. Одна из них заключается в том, что на севере края (Приморская ГРЭС) имеет место значительный избыток мощности, а на юге края (города Владивосток, Артем, Уссурийск, Партизанск, Находка и др.) – дефицит мощности. То есть, на работу станций, расположенных на юге края влияет ограничение перетока мощности в сечении Приморская ГРЭС – ЮГ, так как загрузка Приморской ГРЭС более экономична, чем загрузка электростанций, расположенных на юге края.



Другая особенность. В 2013 году в эксплуатацию была введена новая линия 500 кВ ПС Владивосток – ПС 500 кВ Лозовая. В результате схема сети линий 500 кВ стала кольцевой (рис. 1). С одной стороны это позволило, значительно увеличить максимально допустимый переток (МДП) по линиям Приморская ГРЭС – Чугуевка 2; Приморская ГРЭС – Дальневосточная. С другой стороны наиболее тяжелым режимом работы Приморской энергосистемы является случай, когда отключена одна из линий 500кВ, по которой осуществляется переток мощности в энергосистему (Приморская ГРЭС – Чугуевка 2; Приморская ГРЭС - Дальневосточная).

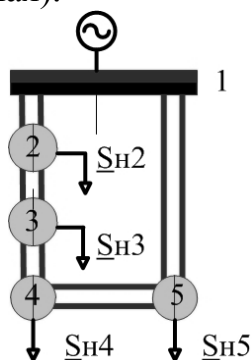


Рис.1. Упрощенная схема сети 500 кВ Приморской энергосистемы

В модели будет учтено наличие шунтирующих реакторов (ШР), и управляемых шунтирующих реакторов (УШР) на подстанциях 220-500 кВ. В модели также будет смоделировано действие устройств противоаварийной автоматики, установленной в энергосистеме Приморского края.

В качестве средств верификации модели планируется использовать данные из регистраторов аварийных событий, установленных на электростанциях и подстанциях 500 и 220 кВ.

В результате моделирования установившихся режимов получена расчетная схема, дающая возможность получать результаты весьма близкие к полученным на практике. Данный факт говорит возможности применения схемы для расчета энергетических режимов, уставок противоаварийной автоматики, а так же для проверки сохранения статической аperiodической и динамической устойчивости.

Подобный подход применялся при разработке математической модели для расчета установившихся и динамических режимов в Томской энергосистеме [2]. Верификация модели Томской энергосистемы проводилась по имеющимся сведениям о произошедших аварийных ситуациях и показала достаточно точное совпадение расчетных и реальных процессов.

Дальнейшее направление работы связано с моделированием действий современных устройств компенсации и противоаварийной автоматики.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Герасимов А.С., Есипович А.Х, Смирнов А.Н. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем // Электрические станции. – 2010. – №11. – С.14–19.
2. Вайнштейн Р.А., Кац И.М., Коломиец Н.В., Лоцман Д.С., Приходько С.Н., Русол Д.А., Шестакова В.В. Опыт расчетов электромеханических переходных процессов в энергосистемах большой размерности. Сборник докладов научно-технической конференции «Релейная защита и противоаварийная автоматика. Перспективы развития» – Кемерово: Изд-во ОДУ Сибири, – 2011.

Научный руководитель: В.В. Шестакова, к.т.н., доцент кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ

### **МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА**

А.А. Суворов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС, группа 9490

Существенное повышение управляемости и эффективности функционирования электроэнергетических систем может быть достигнуто путем применения управляемых технологий и устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems), к которым относятся: управляемые шунтирующие реакторы (УШР), статические тиристорные компенсаторы (СТК), статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) и другие средства FACTS, среди которых наиболее распространённым в настоящее время, особенно в российских сетях, является УШР. Основное назначение УШР: компенсация реактивной мощности для регулирования напряжения и минимизации потерь электроэнергии. Применяются два типа УШР: УШР трансформаторного типа (УШРТ) и УШР с подмагничиванием (УШРП), моделированию которого посвящена данная работа.

На общем сердечнике УШРП располагается сетевая, компенсирующая и обмотка управления. Сетевая обмотка является основной рабочей, управляющая подключена к регулируемому источнику постоянного напряжения. Каждая из обмоток создает свои магнитные потоки: сетевая обмотка - переменный поток промышленной частоты; управляющая – постоянный, регулируемый поток подмагничивания, смещающий переменный поток в соответствии с кривой намагничивания, включая область насыщения, что приводит к изменению индуктивного сопротивления устройства. При насыщении сердечника возникает искажение сигнала, связанное с протеканием тока третьей гармоники, для ограничения которого применяется соединенная в треугольник компенсационная обмотка.

При формировании уравнений, описывающих процессы протекающие в УШРП, учитывается взаимодействие каждой обмотки фазы с основным магнитным потоком и потоком рассеивания. Согласно обозначенному подходу создаваемая математическая модель должна объединять в себе систему уравнений трех фаз указанного трехобмоточного реактора, которая включает в себя:

1. Уравнения магнитосвязанных потоком фазы контуров каждой обмотки:

$$w_{COi} \frac{d\Phi_{0i}}{dt} + L_{COi} \frac{di_{Ci}}{dt} + r_{COi} i_{COi} = u_{COi} \quad (1)$$

$$w_{KOi} \frac{d\Phi_{0i}}{dt} + L_{KOi} \frac{di_{KOi}}{dt} + r_{KOi} i_{KOi} = 0 \quad (2)$$

$$w_{YOi} \frac{d\Phi_{YOi}}{dt} + L_{YOi} \frac{di_{YOi}}{dt} + r_{YOi} i_{YOi} = u_{YOi} \quad (3)$$

где:  $w_{ji}$  – число витков  $j$  – ой обмотки;

$i$  – фазы  $A, B, C$ ;

$\Phi_0$  – мгновенное значение основного магнитного потока фазы  $i$ ;

$\Phi_{YO}$  – мгновенное значение магнитного потока управления фазы  $i$ ;

$L_{ji}$  – индуктивность рассеивания  $j$  – ой обмотки фазы  $i$ ;

$i_{ji}$  – мгновенное значение тока в  $j$  – ой обмотке фазы  $i$ ;

$r_{ji}$  – активное сопротивление  $j$  – ой обмотки фазы  $i$ ;

$u_{ji}$  – мгновенное значение напряжения  $j$  – ой обмотки фазы  $i$

2. Уравнения магнитодвижущих сил для каждой фазы:

$$w_{COi} \cdot i_{COi} + w_{KOi} \cdot i_{KOi} + w_{OVi} \cdot i_{OVi} = F_{нами} \quad (4)$$

где  $F_{нами}$  – намагничивающая сила для фазы  $i$ , определяемая с учетом возможного насыщения стали выражением:

$$\Phi_{0i} = K_{\mu} f(F_{нами}) \quad (5)$$

Полученные системы уравнений позволяют синтезировать соответствующую математическую модель УШРП, воспроизводящую процессы в обмотках, с учетом магнитопровода и его нелинейности, а также программно-аппаратной реализации данной модели, которая позволит бездекомпозиционно и непрерывно в реальном времени и на неограниченном интервале осуществлять обработку такого рода математических моделей, содержащих жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений, с гарантированной точностью. Решение такой модели численным путем не эффективно, в связи с необходимым для этого упрощением и ограничением математической модели, и как следствие сокращением полноты и достоверности моделирования.

Создание указанной модели и разработка альтернативного пути решения, а также программно-аппаратных средств, адаптированных для применения в соответствующей среде моделей ЭЭС является весьма актуальной задачей, с решением которой связана данная работа, включающая синтез обозначенной математической модели и создание программно-аппаратных средств – специализированного процессора УШР (СПР), структура которого изображена на рисунке 1.

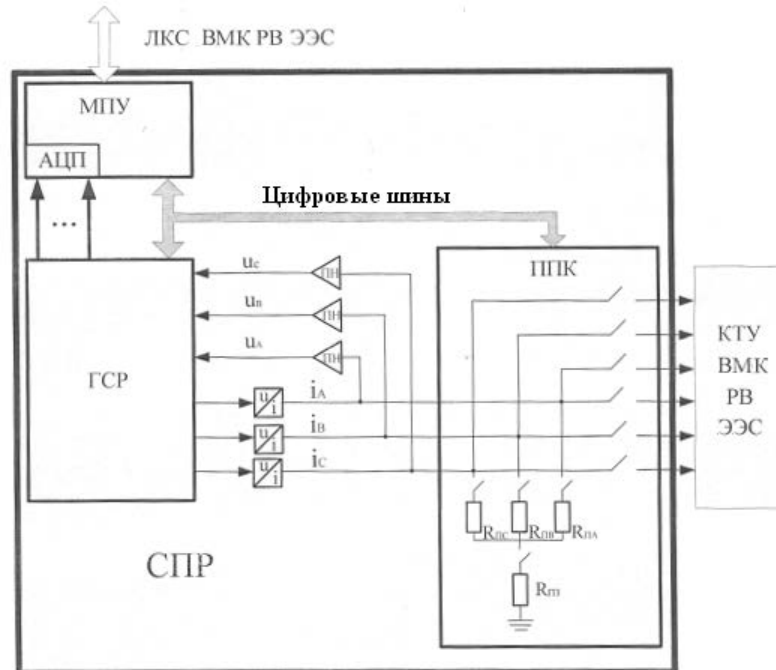


Рис. 1. Структура специализированного процессора УШР

В состав СПР входят:

1. Микропроцессорный узел (МПУ), с помощью которого моделируется САУ УШРП и всё информационное управление. МПУ содержит центральный и периферийный микроконтроллер и аналого-цифровой преобразователь. САУ УШРП имеет три канала: по напряжению, по току и по реактивной мощности. Пример блок-схемы работы САУ по напряжению приведен на рисунке 2. Данный канал содержит защиты от перегрузок, от перенапряжения. Есть режимы форсированной загрузки и разгрузки УШРП. Изменение сопротивления УШРП пропорционально отклонению напряжения на шинах подключения УШРП от уставки.
2. Гибридный сопроцессор реактора (ГСР), с помощью которого осуществляется непрерывное и неявное решение системы дифференциальных уравнений математической модели УШРП в реальном времени и на неограниченном интервале. Выходные переменные ГСР представляются выходными напряжениями, которые преобразуются с помощью преобразователей  $u/i$  в модельные физические токи. Непрерывная информация о напряжениях в выходных узлах с помощью повторителя напряжений вводится в ГСР.

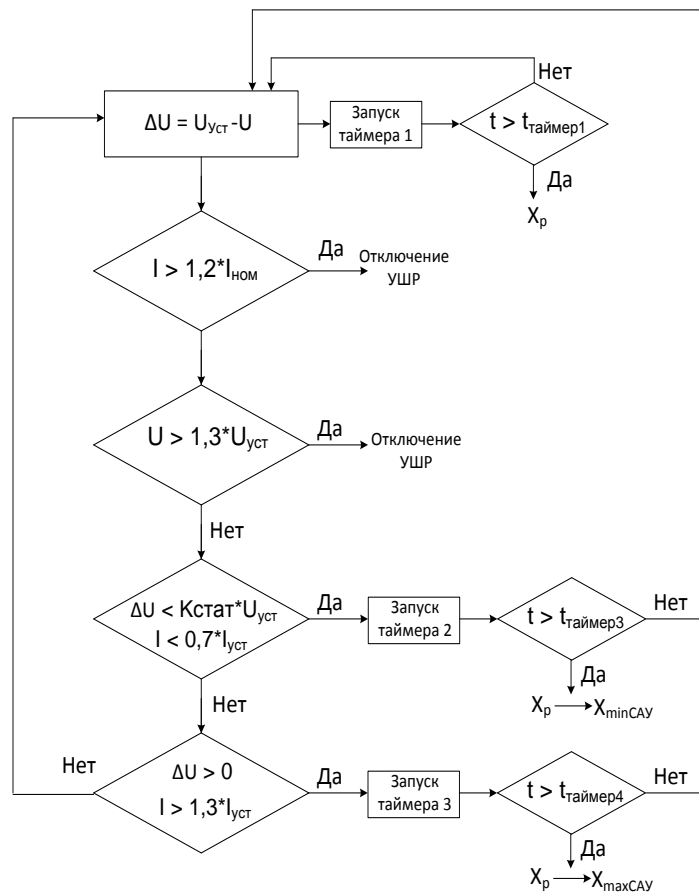


Рис. 2. Блок схема работы канала САУ по напряжению

- Для осуществления всевозможного спектра трехфазных и пофазных продольно-поперечных коммутаций (ППК) используется цифро-управляемые аналоговые ключи. Переходное сопротивление коммутации реализуется с помощью цифро-управляемых сопротивлений.

Разработанный подобным образом СПР адаптирован для использования во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем, который был создан в Энергетическом институте Томского политехнического университета [1].

#### ЛИТЕРАТУРА:

- Боровиков Ю. С., Гусев А. С., Сулайманов А. О. Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем. – Электричество, 2012, №6. С.10-13.

Научный руководитель: А.С. Гусев, д.т.н., профессор, кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ.

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЕРЕДАЧИ И ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ГИБРИДНОЙ СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Р.А. Уфа  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС

## **Введение**

Развитие силовой полупроводниковой техники в течение последних нескольких лет обусловило появление в энергосистемах новых устройств высоковольтной передачи энергии постоянным током (ВППТ), обеспечивающих различные режимы управления, преобразования и передачи. Технологии ВППТ, по сравнению с традиционными устройствами передачи энергии на переменном токе, являются более эффективными в решении следующих вопросов: передачи электроэнергии на дальние расстояния; объединения несинхронно работающих электроэнергетических систем (ЭЭС) и их частей. Кроме того, применение ВППТ позволяют устранять колебания мощности в ЭЭС. Вместе с тем, использование технологий ВППТ значительно усложняет эксплуатационные и исследовательские задачи [1]. В число наиболее сложных задач входят: исследование взаимного влияния высоковольтных систем постоянного и переменного тока друг на друга; разработка, тестирование оптимальных и согласованных настроек их СУРЗА (систем управления, релейной защиты и автоматики) [2]. Решение указанных задач требует проведения значительного объема исследований и экспериментов, что невозможно осуществить натурным путем ввиду известной специфики ЭЭС, и не представляется возможным использовать физическое моделирование ввиду чрезвычайной сложности ЭЭС. Поэтому основным инструментом для исследования функционирования ВППТ в составе реальных энергосистем является преимущественно математическое моделирование [3].

## **Требования к системам моделирования.**

С учетом специфики вышеуказанных задач к средствам моделирования предъявляются следующие основные требования [3]: трехфазное моделирование всего значимого оборудования и реальных ЭЭС в целом с учетом допустимого частичного их эквивалентирования; моделирование без декомпозиции режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС в целом в реальном времени и на неограниченном интервале; возможность взаимодействия средств моделирования с внешними устройствами. В настоящее время широко используемые

цифровые комплексы моделирования не отвечают в полной мере перечисленным требованиям. Так как, используемые в этих моделирующих комплексах численные методы предполагают различные ограничения и допущения, что не всегда приемлемо и, безусловно, влияет на достоверность результатов моделирования. Альтернативой чисто цифровым комплексам является гибридное моделирование, под которым понимается объединение различных методов и средств моделирования. Однако эффективность гибридных комплексов будет зависеть от выбранной концепции, поэтому известные решения не всегда обеспечивают достижение поставленной цели. В частности, в [4] представлен гибридный комплекс, который основан на синтезе нескольких численных методов. Однако при детальном анализе можно убедиться, что обозначенное авторами полное и детальное моделирование ЭЭС, учитывающее модели преобразовательных блоков ВППТ, не достигается. Так, расчет быстрых электромагнитных процессов осуществляется с шагом 50 мкс, тогда как время коммутации реальных силовых ключей составляет порядка 5 мкс. Поэтому, непонятно как с таким шагом расчета можно зафиксировать моменты переключения силовых ключей. Так же заявленное авторами моделирование процессов без декомпозиции, в полном смысле этого слова, не осуществляется. Так как, обмен информации между двумя подсистемами, воспроизводящих электромагнитные и электромеханические процессы, осуществляется со временем большим, чем время расчета быстро протекающих процессов. Соответственно, это может привести к тому, что на интервале расчета электромагнитного процесса влияние электромеханических процессов, которые рассчитываются в другой части ЭЭС, не будет воспроизведены. Таким образом, для удовлетворения обозначенных требований и построения модели ВППТ предлагается использовать другую концепцию гибридного подхода моделирования, которая основанная на использовании сразу трех подходов моделирования: аналогового, цифрового и физического. Примером симулятора, разработанного по данному принципу, является Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), архитектура которого более подробно рассмотрена в [5].

#### **Концепция и средства гибридного моделирования ЭЭС.**

Основными элементами ВМК РВ ЭЭС, отвечающими за воспроизведение в реальном времени моделей силового оборудования и его СУРЗА, являются специализированные гибридные процессоры (СГП). Все СГП имеют унифицированную многоуровневую структуру, представленную на рис. 1б.



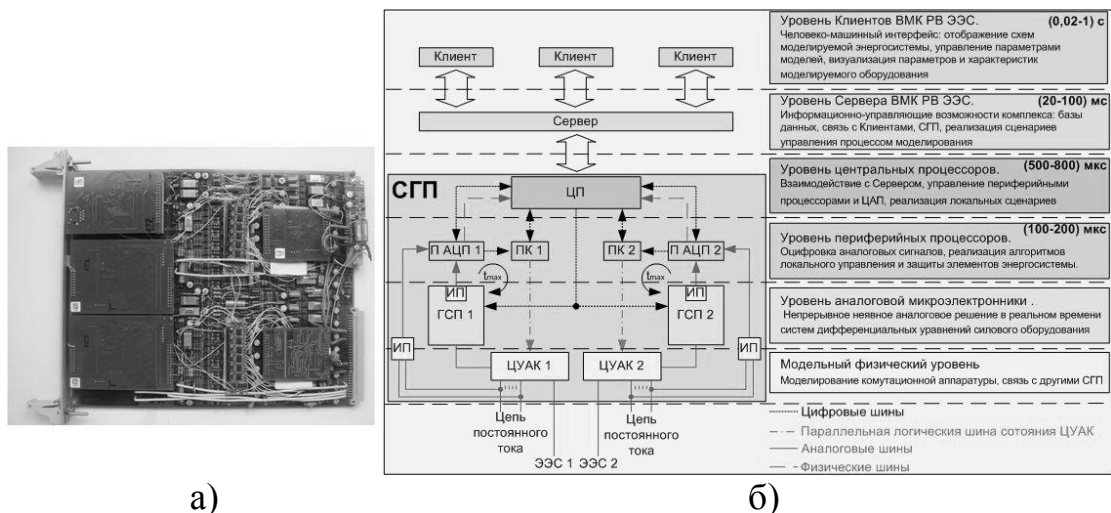


Рис. 1. Опытный образец СГП преобразовательного блока ВППТ (а); Структурная схема гибридных программно-технических средств моделирования (б): ЦП – центральный процессор; ПАЦП 1 и ПАЦП 2 – процессоры аналого-цифровых преобразователей; ПК 1 и ПК 2 – процессоры коммутации; ГСП 1 и ГСП 2 – гибридные сопроцессоры; ЦУАК 1 и ЦУАК 2 - цифруправляемые аналоговые ключи; ИП - измерительный преобразователь;  $t_{\max}$  – время задержки в цифровом канале.

При разработке СГП преобразовательного блока ВППТ особенно важным является физический уровень. Так как, на этом уровне моделируются сами силовые ключи. Они выполняются в виде реальных физических цифруправляемых ключей (ЦУАК), для которых разрабатываются универсальные алгоритмы, реализующихся на цифровом уровне. Это позволяет путем выбора соответствующего алгоритма представить с помощью одного ЦУАК любые типы силовых ключей - диод, полностью управляемый тиристор, биполярный транзистор с изолированным затвором, а также пары встречно-параллельных ключей разных типов (рис.2).

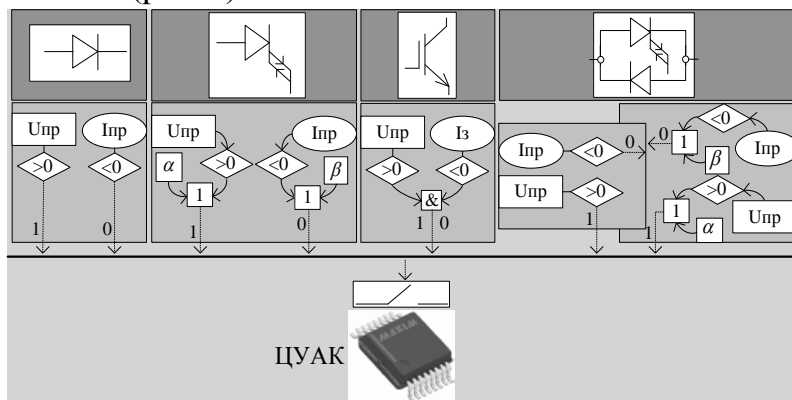


Рис.2. Схема реализации алгоритмов управления силовых ключей посредством ЦУАК.

Для установления факта адекватности воспроизведения используемым ЦАУК реальных коммутационных процессов было проведено сопоставление схем замещения ЦУАК и реальных силовых ключей. Результаты анализа показывают, что схемы их замещения с учетом масштабов токов и напряжений в значительной мере идентичны. Более того схемы замещения ЦАУК при необходимости могут быть скорректированы дополнительными элементами.

Рассмотренный в данной статье материал позволяет сделать следующие выводы: выбранная концепция и ее экспериментальная реализация подтверждает возможность такого подхода обеспечить моделирование больших ЭЭС без декомпозиции в реальном времени и на неограниченном интервале; анализ схем замещения ЦУАК и силовых ключей показывает, что адекватность воспроизведения коммутационных процессов достигается.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 7.2826.2011.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. L'Abbate A, Fulli G. Modeling and application of VSC-HVDC in the european transmission system. *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 2010; 5(1) : 8-16.
2. Zhao X, Priebe T, Curis J-B. Impact of HVDC Stations on Protection of AC Systems. Research report. Joint Working Group JWG B5/B4.25, CIGRE, 2009.
3. Zhang Yi; Gole A M; Wu W, Zhang B, Sun H. Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements. *IEEE Transaction on power system*, 2013; 5(1) : 357-366
4. Fang Tian, Yalou Li, Xiaoxin Zhou, Zhongxi Wu. Research, Development and Application of Advanced Digital Power System Simulator (ADPSS). // *The International Conference on Electrical Engineering*, July 6-10, 2008, pp. 1-6.
5. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гурин С.В., Свечкарев С.В., Плотистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // *Электричество*. - 2009. - №12. - Р. 5-8.

Научный руководитель: А.С. Гусев, д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ.

## **TESTING OF PROCEDURE FOR DANGEROUS SECTIONS AND MAXIMUM ALLOWED POWER FLOWS WITHIN THEM IDENTIFICATION USING TESTING SCHEME**

А.А. Крадецкая

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2Г

To cope with the control problems of operational dispatch management it is unfailingly to have all the essential information regarding power flows limitations in accordance with the transmission capability. In dispatch control practice normal power flows (or power flows limitations) are calculated in advance with the help of well-established methods and are usually determined by the values obtained in worst-case design conditions. However it is impossible to fix transmission constraints for a whole variety of network-performance modes. Therefore this resulted in a burning need to identify dangerous sections (DS) in the structure of a backbone network and maximum allowed power flows within them. Transmission capability consideration in DS-es is required for the most efficient and optimal control of electric power system.

Power system section – a set of all network elements (transmission lines, transformers) linking together two parts of power system or a certain power plant with electric power system. Section can include single transmission lines, as well as several lines and transformers. [5]

Dangerous section (DS) or a so-called ‘weak line’ – a set of certain network elements within one or several electric couples, which shutdown results in a complete splitting of power system into two separate parts. [4]

One of the most serious forms of emergencies in electric power system is its stability breakdown of a synchronous operation and corresponding conversion of it into the asynchronous mode. That is why static stability violation or stability band overrun under emergency conditions is considered to be the main criteria used to indicate DS-es of power systems. Sustainability requirement is one of the main conditions among those imposed to a technical system (including power system) and normally determines its working efficiency. [8]

Currently there can be pointed out 3 main groups of possible alternatives to identify dangerous sections:

- methods based on the analysis of mode parameters;
- methods based on the analysis of the Jacobi matrix;
- methods that form the DS according to a weak-coupling characterized by the presence of ECS (conventional engineering meth-

od) and also methods connected with the concept of a minimum voltage point. [6]

Here method based on the analysis of the Jacobi matrix has the most widespread application as it is behind many software systems used for calculating real electric power systems and electric couples. This method is implemented via equivalent transformations. Generators are dated with a  $PE_q$ -model which allows considering the interrelation of both generator active and reactive power operation. Using such procedure we can accomplish a continuous mode loading with a rather small parameter changes at each simulation step appointing a sufficiently great number of these steps.

Practical implementation of the abovementioned method is possible with the help of software “Dangerous Sections Identification” powered by software RastrWin3 with the module “Shot Circuit Current”. This software package is designed for obtaining DS-es, maximum allowed power flows within them and modes of corresponding limited breaking power flows considering transmission lines failure and the actions of automatic emergency response system.

Testing of procedure for DS-es and maximum allowed power flows within them identification was carried out using training scheme Trenenergo, figure 1.

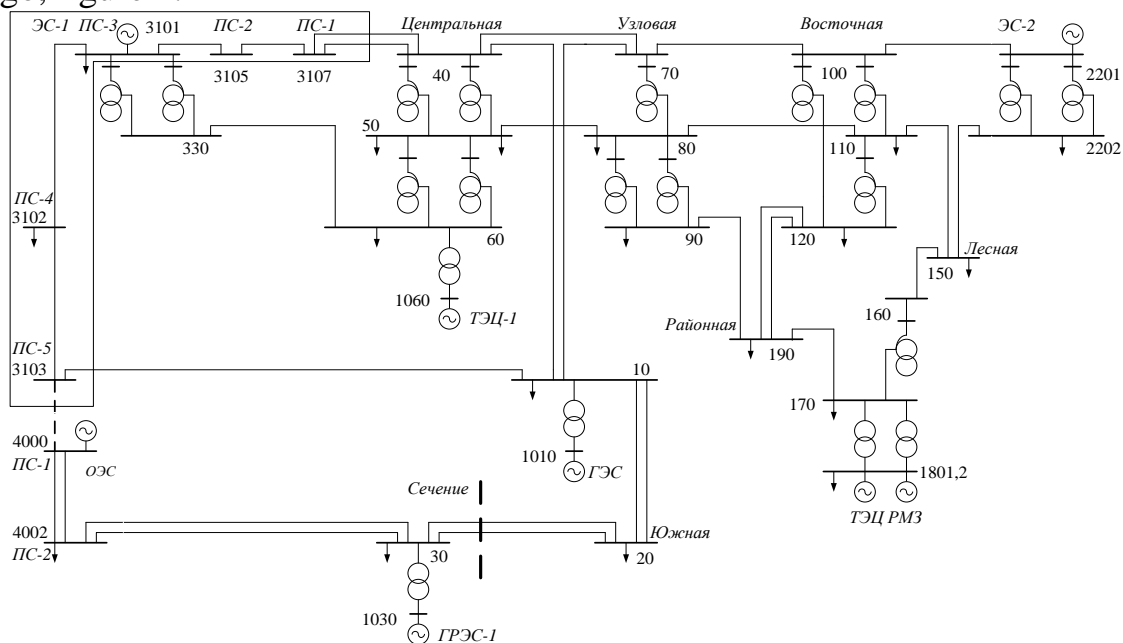


Figure 1. Design circuit of Trenenergo Scheme

The scheme is relatively small and thus clear enough to understand. This fact simplifies the subsequent analysis of the obtained results. Trenenergo Scheme and adjacent power systems PS1 and PS2 are the parts of Bulk Electricity System (BES) which is connected to the United Energy

System (UES). BES network, Trenenergo Scheme and adjacent power systems PS1 and PS2 are performing at voltage of 330,220 and 110 kV. Connection between BES, PS1 and Trenenergo Scheme is carried out via 330 kV transmission lines 3103-4000 and 4002-30. Node 4000 in BES stands for a swing-bus.

Powered by software “Dangerous Sections Identification” DS-es finding scheme can be divided into three steps:

1. Originating of a maximum mode changing vector (MCV) for a steady-state mode.
2. Calculation of DS-es vectors for transmission lines of the main observed scheme fragment and formation of a certain DS.
3. Limiting of the resulting mode up to maximum power flow equal to MAP through this DS.

MCV is a set of nodes (network elements) which determine the trajectory of mode changing. Each power MCV must be power-balanced, so its load and generation parts must be maintained equal. Therefore, each MVC component has its non-dimensional coefficient of load or generation contribution, correspondingly  $k_L$  and  $k_G$ . Table 1 shows obtained for the addressed scheme MVC contribution coefficients.

Table 1. MVC originating via contribution coefficients

Node number	Name	$K_L$	$K_G$
4002	Substation-2 BES 330 kV	0,32	
30	Regional Power Station-1 330 kV	0,12	
1030	Regional Power Station-1 15 kV		0,57
20	Iuzhnaia Substaion 330 kV	0,36	
10	Hydroelectric Station 330 kV	0,20	
1010	Hydroelectric Station 15 kV		0,43

It should be mentioned that DS-es calculation was performed for a number of emergency conditions: line tripping of Substation-5 (PS-1) – Hydroelectric Station and Substation-2 (BES) – Regional Power Station-1 transmission lines.

Results obtained throughout calculations are shown in Figures 2, 3.

...	№ ВИР	ранг	N_сеч	Имя	Тип	назв. Аварии	назв. ВИР	P_сеч	Pпред	Ав.Рпред	Pнепер Кол	...	▼	Код А	МДП сеч	АДП сеч	
1	2	1	1	4	Найденное ОС	Траектория утяжеления		1 888	2 615	2 521	94			3	2	1 936	2 229
2	1	1	1	2	Найденное ОС	Траектория утяжеления		1 888	2 628	2 564	95			3	2	1 972	2 269
3				3	Обычный			3 019									
4				1	Обычный			-2 918									

Figure 2. Calculation data for DS-es and MAP through them

	..	Имя	N_нач	N_кон	PI	Кдел
1	1	ПС-5 ЭС-1 330 кВ-ПС-1 ОЭС 330 кВ	3103	4000	-716	
2	1	ПС Южная 330 кВ-ГРЭС-1 330 кВ	20	30	-1 101	
3	1	ПС Южная 330 кВ-ГРЭС-1 330 кВ	20	30	-1 101	

Figure 3. Results of DS-es identification over transmission lines

According to the obtained results, transmission lines 3103-4000 and 20-30 in Trenenergo Scheme are overloaded. Thus, any emergency situation occurrence leads to BES segment separation from the rest part of the scheme and, correspondingly, to full separation of the concerned power system into two independent parts.

#### REFERENCES:

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
2. Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: STT, 2005. – 176 с.
3. Курмак В.В. Совершенствование метода выявления и мониторинга опасных сечений электроэнергетической системы. – Автореферат, 2012г. – 20 с.

Научный руководитель: Е.С. Тарасова, старший преподаватель кафедры ИЯЭИ ЭНИН.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

В.А. Сулайманова  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС, группа 5АМ2Б

В ТПУ разработан всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [1]. Реализованные в данном комплексе гибридные процессоры, моделирующие синхронные машины, обеспечивают достаточно полное и адекватное воспроизведение процессов в синхронных машинах во всем спектре нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. Актуальной задачей является и воспроизведение процессов в системах возбуждения (СВ) для данных гибридных процессоров.

Поскольку, наряду с внедряемыми в настоящее время микропроцессорными АРВ и СВ с современными управляемыми полупроводниковыми преобразователями в эксплуатации еще длительное время будут находиться различные виды и типы ранее созданных СВ и АРВ, целесообразными являются предусмотренные в ВМК РВ ЭЭС библиотека реализуемых в гибридных процессорах адекватных математических моделей существующих СВ и АРВ, а также специально разработанный САПР, позволяющий синтезировать в гибридных процессорах любые другие математические модели потенциально возможных СВ и АРВ.

Представленный на рис. 1 структурная схема математической модели определяемая передаточными функциями системы дифференциальных уравнений, настроечных коэффициентов и параметров обеспечивают достаточно полное и достоверное воспроизведение процессов в системе возбуждения с различными видами автоматического компаундирования и электромагнитным корректором напряжения и АРВ, влияющих на адекватность всережимного моделирования функционирования собственно машин и ЭЭС в целом:

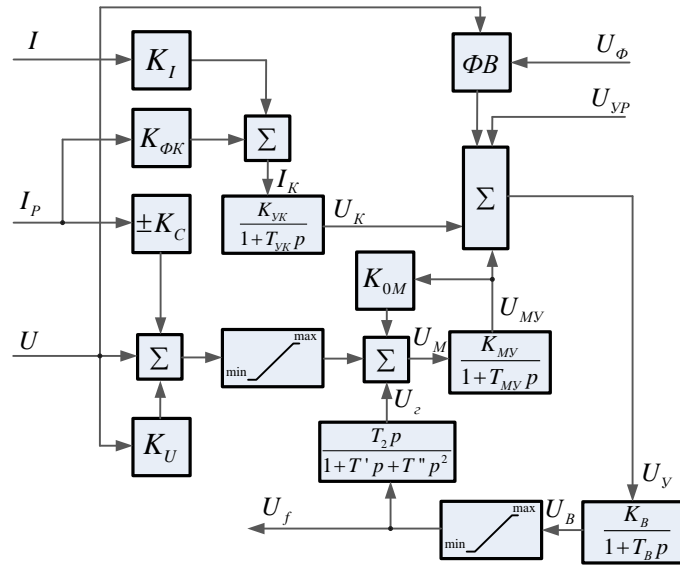


Рис. 1. Структурная схема математической модели систем возбуждения с различными видами автоматического компаундирования и электромагнитным корректором напряжения.

Для данной структуры:

– дифференциальное уравнение канала компаундирования, в том числе управляемого

$$\frac{dU_K}{dt} = \frac{1}{T_{УК}} (K_{УК} I_K - U_K), \quad (1)$$

– дифференциальное уравнение магнитного усилителя

$$\frac{dU_{МУ}}{dt} = \frac{1}{T_{МУ}} (K_{МУ} I_M - U_{МУ}), \quad (2)$$

– дифференциальное уравнение возбудителя

$$\frac{dU_B}{dt} = \frac{1}{T_B} (K_B I_y - U_B), \quad (3)$$

– дифференциальное уравнение гибкой обратной связи по напряжению возбуждения  $U_f$

$$T'' \frac{d^2 U_\Gamma}{dt^2} + T' \frac{dU_\Gamma}{dt} - T_\Gamma \frac{dU_f}{dt} + U_\Gamma = 0, \quad (4)$$

$$T'' \frac{d^2 U_\Gamma}{dt^2} + \frac{d(T' U_\Gamma - T_\Gamma U_f)}{dt} + U_\Gamma = 0, \quad T'' \frac{d^2 U_\Gamma}{dt^2} + T' U_\Gamma - T_\Gamma U_f + Z_\Gamma = 0,$$

– дифференциальное уравнение гибкой обратной связи по напряжению возбуждения  $U_f$  в преобразованном виде

$$\frac{dU_\Gamma}{dt} = \frac{1}{T''} (T_\Gamma U_f - T' U_\Gamma - Z_\Gamma), \quad \text{где } \frac{dZ}{dt} = U_\Gamma, \quad (5),$$

здесь  $K_I$  – коэффициент компаундирования по полному току статора  $I$ ,  $K_{ФК}$  – коэффициент фазового компаундирования, определяющий акцентное регулирование по реактивному току статора  $I_P$ ,  $K_C$  – коэффициент статизма корректора напряжения статора  $U$ ,  $K_U$  – коэффициент уставки напряжения статора  $U$ ,  $K_{ОМ}$  – коэффициент обрат-



ной связи магнитного усилителя, ФВ – различные виды форсировки и расфорсировки возбуждения,  $U_{\Phi}$  – задание уставок релейной форсировки возбуждения,  $U_{ур}$  – задание уставок и регулирование возбуждения по каналу ручного управления.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество, 2012. – №. 6 – С. 10-13.
1. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимная математическая модель синхронных машин //Электрические станции, 2009

Научный руководитель: А.С. Гусев, д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ.

### **ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ИЗМЕРЕНИЕМ НА ВЫСОКОЙ СТОРОНЕ**

Т.Ю. Иванова, А.А. Козырева, Т.А. Сергеева  
Томский политехнический университет

Одной из основных тенденций современного развития и совершенствования электрических сетей и энергосистем в целом является радикальное повышение их целенаправленной управляемости при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы путем внедрения новейших устройств и систем. Одним из таких устройств может стать разрабатываемый цифровой трансформатор тока.

Традиционные, занимающие до 80% рынка электромагнитные ТТ обладают рядом существенных недостатков [1].

Появившиеся в настоящее время измерительные оптические трансформаторы тока решают почти все проблемы традиционных трансформаторов [3].

Однако существенным препятствием для повсеместного использования оптических трансформаторов тока является их высокая стоимость, которая кратно превышает стоимость традиционных ТТ.

Цифровой трансформатор тока разработанный в ТПУ имеет все преимущества оптических ТТ. Кроме того, изготовленный экспериментальный образец позволяет предположить, что при серийном производстве его стоимость не будет превышать стоимости традиционных ТТ. Еще одним преимуществом разработанного трансформатора является возможность переоборудования уже установленных электромагнитных ТТ (без замены), что позволяет добиться тех же характеристик при более низких затратах.

SWOT анализ разработки цифрового трансформатора тока

Для оценки сильных и слабых сторон проекта была составлена SWOT матрица (Рис. 1).

	<b>Положительное влияние</b>	<b>Отрицательное влияние</b>
	<b>Сильные стороны:</b>	<b>Слабости:</b>
Внутренняя среда	(1.1-1) Высокие технические характеристики	(1.2-1) Уступающие зарубежным конкурентам возможности по маркетинговой политике
	(1.1-2) Получение постоянного источника дохода от контрактов, связанных с обслуживанием и экспертным сопровождением ЦТТ	(1.2-2) Невозможность серийного производства в ближайшей перспективе
	(1.1-3) Собственная уникальная технология	(1.2-3) Отсутствие охраняемых документов на РИД
	<b>Возможности:</b>	<b>Угрозы:</b>
Внешняя среда	(2.1-1) Захват большей доли рынка за счет конкурентных преимуществ	(2.2-1) Несанкционированное копирование технологии
	(2.1-2) Конкурентная стоимость	(2.2-2) Предкризисное состояние экономики
	(2.1-3) Большой объем рынка энергетического оборудования	(2.2-3) Консерватизм потребителей

Рис. 1 – SWOT матрица разработки цифрового трансформатора тока

Ниже приведены комментарии к элементам матрицы.

(1.1-1). По сравнению с традиционными ТТ разработанная в ходе проекта конструкция обладает улучшенными точностными характеристиками, расширенной полосой пропускания, сохранением точности при внешних климатических воздействиях, повышенной безопасностью и экологической чистотой.

(1.1-2). Гарантийное и послегарантийное обслуживание, своевременная модернизация установленного оборудования может принести до 30% дополнительной выручки. Производство комплектующих для переоборудования традиционных ТТ без замены может принести еще 20% дополнительной выручки. Таким образом, сопутствующее производство имеет возможность увеличить выручку до 50 %.

(1.1-3). Осуществлен новый подход к построению цифрового трансформатора тока (ЦТТ) высокого напряжения расположенного на высокой стороне, заключающийся в том, что в его состав включены несколько традиционных датчиков тока, работающих на разных принципах. Выбран вариант, содержащий стандартный магнитный трансформатор тока (МТТ), воздушный трансформатор тока (ВТТ) и токовый шунт. Предложены способы восстановления информации о токе, протекающем в первичном проводнике, содержащем гармонические составляющие и искаженные в датчиках тока, посредством использования информации с других датчиков тока:

- информация, полученная с магнитного трансформатора тока для нормальных режимов, искаженная в виду нелинейности магнитопровода, подлежит восстановлению, используя информацию о гармоническом составе тока полученном в токового шунта;
- информация, полученная с воздушного трансформатора тока корректируется в нормальных режимах на основе восстановленного сигнала с МТТ;
- информация, полученная в аварийных режимах и содержащая апериодическую составляющую снимается с ВТТ и корректируется на основе показаний полученных в нормальном режиме.

(1.2-1). Вопросы продвижения на рынок новых товаров, технологий и услуг – общеизвестное слабое место в работе российских вузов и предприятий. Коллектив разработчиков не имеет возможности вплотную заниматься продвижением своей технологии на рынок.

(1.2-2). Этот недостаток вытекает из предыдущего. Коллектив разработчиков не имеет налаженного производства для немедленного начала выпуска новой продукции. Здесь, возможно, необходим поиск промышленного партнера, который будет иметь возможность и желание внедрить данную разработку в производство.

(1.2-3). Коллектив разработчиков планирует подать заявку на патент в ближайшее время. Заявочная документация разработана.

(2.1-1). При поддержке сильного промышленного партнера или инвестора и быстром выходе на рынок существует возможность стать монопольным игроком, то есть осуществить захват 50% существующего рынка измерительных ТТ.

(2.1-2). Использование новых инновационных материалов и технологий позволяет добиться цены, сравнимой с ценой традиционных трансформаторов.

(2.1-3). В настоящее время электроэнергетика вплотную подошла к необходимости масштабной модернизации сетей. Становятся весьма актуальными вопросы энергоэффективности, энергосбережения и построения «умных» сетей. При решении этих задач особое внимание уделяется учету и управлению безопасности при транспортировке и распределении электрической энергии. Измерительные ТТ и ТН – это основное оборудование, которое будут устанавливать и модернизировать в первую очередь. Поэтому разработка ЦТТ с улучшенными техническими характеристиками и конкурентной стоимостью будет положительно воспринята рынком, объем которого можно оценить десятками миллиардов рублей.

(2.2-1). Преодоление данной угрозы связано с получением охранных документов на РИД и темпами выхода на рынок.

(2.2-2). Помешать реализации проекта могут продолжающиеся макроэкономические кризисные явления. Существует вероятность, что в электроэнергетике будут отсутствовать финансовые средства для модернизации сетевого хозяйства и, следовательно, для закупки оборудования. Преодоление риска может быть связано с разработкой новых маркетинговых стратегий продаж для снижения единовременной финансовой нагрузки на потребителя (рассрочка, абонентская плата и т. п.).

Потребитель традиционно с большим запаздыванием воспринимает новые идеи и разработки. Преодоление риска связано с разработкой эффективной стратегии продвижения товара и улучшением работы с потребителями.

Проведенный SWOT анализ разработки цифрового трансформатора тока позволяет сделать вывод о перспективности рыночного потенциала полученных в ходе НИР результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Киреева Э.А., Бодрухина С.С. Эксплуатация измерительных трансформаторов тока и напряжения в современных условиях // Промышленная энергетика. - 2008. - № 4. - С. 9-14.
2. Романова Е.В. Трансформаторы тока: цена и качество. Баланс инте-ресов // Главный энергетик. – 2010.- № 1.- С. 32-33.
3. Финаев В.И., Скубилин М.Д., Заргарян Ю.А. Волоконно-оптические преобразователи в электроэнергетике // Известия

Южного федераль-ного университета. Технические науки. -  
2013.- № 2.- С. 213-222.

Научный руководитель: А.О. Сулайманов, к.т.н., зав. НИЛ МЭЭС  
ЭНИН ТПУ.

## **2. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДОСТОВЕРНОЙ НАСТРОЙКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

М.В. Андреев  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) представляют собой очень сложные динамические системы, в которых силовое оборудование: генераторы, трансформаторы (автотрансформаторы), линии электропередачи (ЛЭП) и др. тесно взаимосвязано между собой единым и непрерывным процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. При этом силовые трансформаторы и автотрансформаторы, наряду с присущими им функциями, являются технологическими «концентраторами» и относятся к категории наиболее дорогостоящего оборудования ЭЭС. В связи с этим их необоснованное отключение или выход из строя связаны со значительным технологическим и экономическим ущербом. Минимизировать эти последствия позволяет правильное действие релейной защиты (РЗ) и прежде всего основной – дифференциальной защиты трансформаторов (ДЗТ).

Несмотря на вышесказанное, согласно обобщенной статистике аварийности в российских и зарубежных ЭЭС, примерно 25% тяжелых аварий являются следствием неправильных действий РЗ и противоаварийной автоматики (ПА) [1], в том числе и ДЗТ, которая работает неправильно примерно в 20 % случаев. Поломки и дефекты учтены в этой статистике отдельно, а соответственно главной причиной, помимо использования при расчете уставок ДЗТ недостаточно полной и достоверной информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС, является неадекватный учет в существующих методиках: 1) броска намагничивающего тока; 2) погрешностей, формируемых измерительными трансформаторами тока (ИТТ); 3) погрешностей, формируемых конкретными реализациями ДЗТ; 4) влияния апериодической составляющей.

Если получение достоверной информации о любых процессах и режимах в ЭЭС в настоящее время уже не является невыполнимой задачей, ввиду появления и развития средств моделирования ЭЭС, та-

ких как RTDS, eMEGASim и, в особенности, созданный сотрудниками лаборатории «Моделирование ЭЭС» Энергетического института ТПУ Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), и др., то решение проблемы минимизации второго фактора по-прежнему является актуальным.

Ввиду того, что существующие методики расчета уставок ДЗТ, разработанные много лет назад, в короткий срок не могут быть полностью переработаны или дополнены в нужной степени, наиболее перспективным направлением по решению задачи достоверной настройки ДЗТ является создание средств их всережимного моделирования, достоверно воспроизводящих процессы в конкретных реализациях и, особенно, ИТТ.

Для решения обозначенной задачи автором разработана методика, включающая в себя следующие этапы:

1. анализ принципиальных схем ДЗТ для формирования адекватных схем замещения;
2. составление схем замещения с учетом ИТТ и особенностей конкретных реализаций;
3. получение передаточных функций (ПФ) конкретных устройств ДЗТ с учетом ИТТ с целью их анализа во временной и частотной областях;
4. ранжировка с помощью теории точности и чувствительности элементов схемы и её функциональных узлов для оценки их влияния на точность функционирования синтезированных моделей с целью их упрощения, в случае необходимости;
5. предварительное компьютерное тестирование и исследование полученных математических моделей с помощью программ Mathcad, MATLAB Simulink др.;
6. формализация полученных математических описаний в виде программных кодов для реализации математических моделей ДЗТ в средствах их применения;
7. всестороннее экспериментальное исследование разработанных средств всережимного моделирования ДЗТ в ЭЭС.

На основании данной методики были разработаны математические модели устройств ДЗТ всех типов, достоверно воспроизводящие весь спектр процессов в конкретных реализациях ДЗТ и в ИТТ. Эти модели легли в основу программы математического моделирования ДЗТ – ММДЗТ [2], позволяющей:

- осуществлять достаточно полное и достоверное воспроизведение процессов в ДЗТ на базе реле РНТ-560/ДЗТ-10, ДЗТ-21/ДЗТ-23, цифровых ДЗТ при различных по спектру и уров-

ням сигналов на входах ИТТ, в том числе задаваемых реальными осциллограммами, и выполнять всесторонние исследования этих защит;

- производить проверку и адекватную настройку ДЗТ для конкретных условий их функционирования в ЭЭС: 1) путем применения ММДЗТ в соответствующих средствах моделирования ЭЭС; 2) путем автономного использования ММДЗТ на персональных компьютерах и загрузки массивов мгновенных значений (осциллограмм) входных сигналов ИТТ, в том числе в виде COMTRADE-файлов, полученных с помощью соответствующих средств моделирования ЭЭС или аварийных регистраторов;
- проводить достоверный анализ и выявлять причины неправильных действий защит, связанных с функционированием элементов и их совокупностей в конкретных ДЗТ и ИТТ, разрабатывать рекомендации по их модернизации или модификации.

Разработанные программные средства математического моделирования дифференциальных защит трансформатора (ММДЗТ) предназначены для использования в проектных и научно-исследовательских организациях электроэнергетической отрасли, службах РЗ ЭЭС, а также в ВУЗах энергетического профиля.

Алгоритм работы с программой представлен на рисунке 1. Фрагменты пользовательского интерфейса ММДЗТ для разных типов защит представлены на рисунке 2.



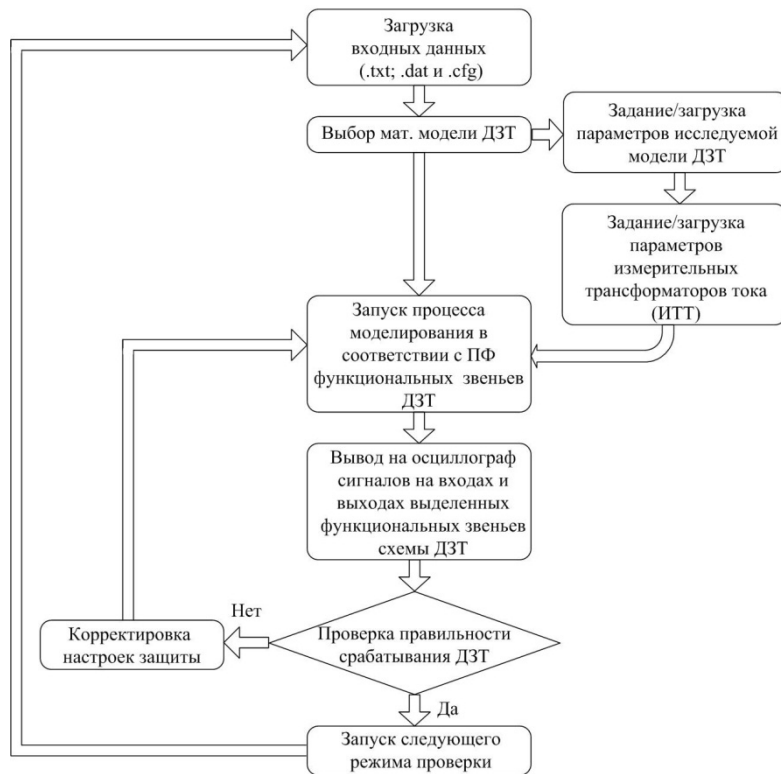


Рис. 1. Алгоритм работы с программой ММДЗТ

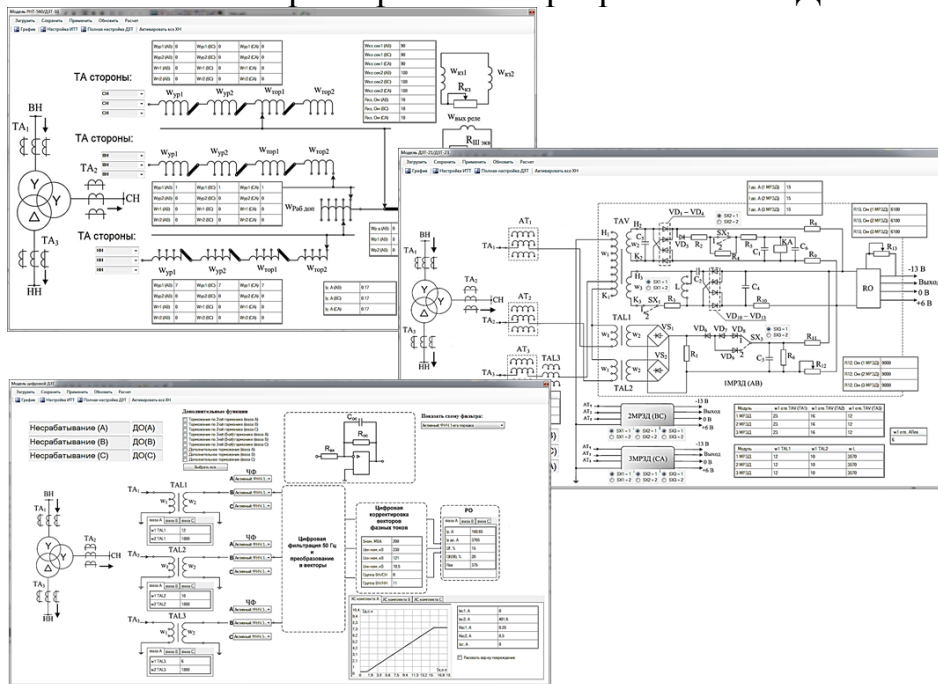


Рис. 2. Программные окна управления моделями ДЗТ в ММДЗТ

Разработанная программа ММДЗТ успешно прошла ряд экспериментальных исследований на модели Томской ЭЭС, реализованной в ВМК РВ ЭЭС, подтвердивших существование обозначенной в работе проблемы неадекватной настройки ДЗТ, производимой в соответствии с существующими методиками расчета уставок. Кроме того,

данные исследования продемонстрировали эффективность ММДЗТ в качестве инструмента обоснованной корректировки данных уставок ДЗТ различных видов и типов в реальных условиях функционирования защит. Данная программа внедрена в ОАО «Томские магистральные сети», о чем имеется соответствующий акт.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 7.2826.2011.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гуревич В.И. Проблемы оценки надежности релейной защиты. // Электричество – 2011. – №2. – С. 28-31.
2. М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. – №3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9343>, свободный, 11.06.2013.

### **РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЕМ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКТНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА СЕРИИ КМУ-1**

И.В. Данько

Восточно-Казахстанский государственный технический  
университет им. Д.Серикбаева

Создание энергосистем и объединение их между собой на огромных территориях стало основным направлением развития электроэнергетики мира в XX-XXI веках. Главная цель функционирования любой энергосистемы бесперебойное энергоснабжение потребителей.

Электрооборудование ТП, РП, РУ, установленное на промышленных и гражданских сооружениях в странах СНГ, было введено в эксплуатацию с 60 - 80 г. прошлого века и в настоящее время имеет значительный износ, и требует замены. Большая его часть снята с производства и приобретение запасных частей к нему - проблематично, либо вообще не предоставляется возможным.

Сегодня в электрохозяйстве большинства предприятий в эксплуатации находится большое количество комплектных распределительных устройств (КРУ), пригодных к работе, но укомплектованных устаревшими коммутационными аппаратами (маслянными выключа-

телями), ресурс которых практически исчерпан. Причина эксплуатации устаревших распределительных устройств не только в нехватке средств на приобретение современного высокотехнологичного оборудования, но и в том, что многие из предприятий оснащены циклом с непрерывным технологическим процессом и обесточивание больших участков распределительных устройств 10 кВ, для производства работ по замене или реконструкции без ущерба электроснабжения невозможно. Существующие размеры помещений ТП, РП, РУ-10 кВ не позволяют устанавливать дополнительное оборудование (новые секции ячеек) - нет свободного пространства, а строительство или приобретение новых сооружений, для размещения распределительных устройств, требует колоссальных финансовых затрат и времени.

До недавнего времени энергослужбы промышленных предприятия пытались продлить сроки службы высоковольтного оборудования (КРУ) за счет ремонтов, профилактики, замены некондиционного оборудования на бывшее в использовании, но еще работоспособное и т.п. Но подобные мероприятия позволяли лишь отсрочить, а не решить проблему безаварийности.

Целью данной работы является реконструкция подстанции с помощью установки комплектного распределительного устройства серии КМУ-1, которая позволяет решить ряд технологических проблем.

Комплектные распределительные устройства серии КМУ-1 с вакуумными выключателями предназначены для приема и распределения электрической энергии трехфазного переменного тока напряжением 10 кВ промышленной частоты 50 Гц в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор или активное сопротивление нейтралью.

Шкафы серии КМУ-1 применяются в закрытых распределительных устройствах (РУ) и электроустановках с частыми коммутационными операциями.

Шкафы КМУ-1 предназначены для замены ранее изготавливаемых в СССР и СНГ шкафов КРУ серий КМ и К104 и имеют ряд преимуществ перед ними.

Достоинство реконструкции заключается в использовании ряда инновационных решений:

- повышенная надежность и безопасность в эксплуатации за счет применения современного высоковольтного вакуумного выключателя;
- уменьшенные габаритные размеры;

- возможность доступа к внутренним элементам шкафа со стороны фасада;
- возможность оперативной и безопасной замены вакуумного выключателя при помощи инвентарной тележки;
- повышенная эксплуатационная безопасность за счет применения более надежных блокировок от ошибочных действий персонала подстанций при оперативных переключениях и ремонтных работах, размещение аппаратуры вспомогательных цепей в отдельном съемном релейном шкафу, который полностью изолирован от силовых цепей камеры, возможность верхнего, нижнего или бокового присоединения шин вводов и выводов;
- перемещение выключателя и наложение заземления производится при закрытых дверях и без усилий, так как применены винтовые многооборотные редукторы;
- применение заземлителя мгновенного действия исключает возможность возникновения дуги;
- установка на шкафах индикаторов высокого напряжения, дающих возможность безопасно получить информацию о наличии высокого напряжения на кабельных присоединениях.

Принципиальная электрическая схема КРУ серии КМУ-1, рассчитанная на 10 кВ представлена на рисунке 1 [2].

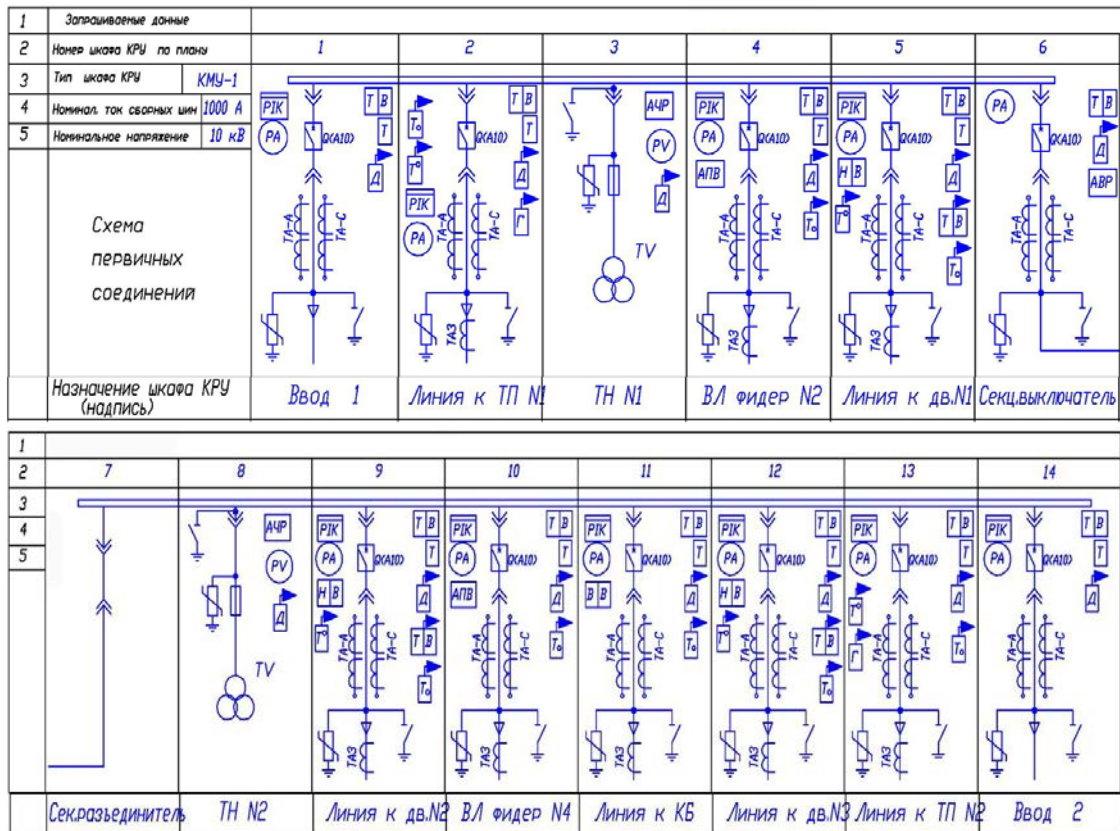


Рис. 1. КРУ-10 кВ из шкафов КМУ-1 [2]

В комплектных распределительных устройствах серии КМУ-1 напряжением 10 кВ большое внимание уделяется энергоэффективности выпускаемой продукции.

Энергоэффективность и энергосбережение на предприятии возрастает за счет ряда нововведений и технологических особенностей.

- С целью снижения потерь при непосредственной передаче электроэнергии:
  - все токоведущие части главных цепей элементов КРУ выполняются только из меди, обладающим низким удельным сопротивлением [1];
  - все контактные соединения имеют гальваническое покрытие для предотвращения ухудшения их контактных свойств при эксплуатации;
  - сведено к минимуму количество разборных контактных соединений, в частности, неподвижный цилиндрический контакт для подключения выдвижного элемента соединен с шиной опрессовкой, его сопротивление не превышает сопротивление цельной шины и не требует обслуживания.
- Снижение затрат электроэнергии при эксплуатации КРУ:
  - для освещения шкафов применяются светодиодные лампы;

- при наличии обогревательных устройств в шкафах и КРУ предусмотрено их автоматическое включение и отключение (применение температурных датчиков).
3. Снижение затрат, связанным с авариями и нарушением подачи электроэнергии:
    - шкафы КРУ разделены на отсеки, что уменьшает зону повреждения при дуговом коротком замыкании в шкафу [1];
    - выдвижные элементы шкафов полностью взаимозаменяемы;
    - дуговая защита на оптоволоконных датчиках снижает до минимума время воздействия открытой дуги, исключительно селективна и исключает ложные срабатывания;
    - электрический привод выдвижного элемента позволяет производить оперативные переключения в минимальные сроки, что ускоряет ввод резерва.
  4. Снижение затрат на ремонт и эксплуатацию электрооборудования:
    - контактные соединения медных шин не требуют постоянного обслуживания;
    - простой шторочный механизм не требует регулировки и обслуживания.

Замена устаревших распределительных устройств на современные КРУ является одним из основных направлений для программы комплексной модернизации энергетики любой страны.

Таким образом, реализация технического перевооружения и реконструкции комплектных распределительных устройств направлена на повышение надёжности эксплуатации оборудования, замену устаревшего оборудования современным, отвечающим международным техническим требованиям. Одним из основных результатов реконструкции является повышение надёжности и безопасности эксплуатации энергосетей, а также снижение стоимости эксплуатации оборудования, благодаря вводу в эксплуатацию современного, высокотехнологичного оборудования с увеличенным межремонтным периодом.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Правила устройства электроустановок/ Астана - П68 го РК— 1-е изд., 2003— 648 с.
2. Комплектные распределительные устройства: каталог продукции АО «КЭМОНТ» - Усть-Каменогорск. – 10 с.:илл.

Научный руководитель: Н.В. Прохоренкова, к.ф.-м.н., ст. преподаватель кафедры Промышленная энергетика ВКГТУ им. Д. Серикбаева.

## **ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНОМ НАГРУЗОЧНОМ РЕЖИМЕ ЛЭП 110 КВ**

П.Н. Шаурко  
Вятский государственный университет

Повышение надежности функционирования электроэнергетических систем во многих случаях может быть обеспечено за счет использования неполнофазных режимов работы электрооборудования, в том числе, неполнофазного нагрузочного режима (НФНР) работы воздушных линий электропередачи (ВЛ). Особенно эффективно использование таких режимов на слабо загруженных тупиковых ВЛ 110 кВ, питающих социально значимые объекты, резервирование которых затруднено или экономически нецелесообразно.

Как показали расчеты и эксперименты, проведенные для ВЛ 110 кВ в одной из энергосистем, работа в неполнофазном нагрузочном режиме при повреждении одной из фаз линии возможна и целесообразна. При проведении эксперимента линия работала в НФНР около 5 часов, причем параметры работы прилегающих сетей и оборудования находились в допустимых пределах. В соответствии с расчетами в неполнофазном режиме передаваемая по ВЛ мощность может достигать 80%  $S_{ном}$  трансформатора приемной подстанции, что больше существующей в настоящее время мощности режима зимнего максимума. Причем, для организации установившегося неполнофазного режима совсем не обязательно переоборудование выключателей на пофазное управление, достаточно иметь пофазное управление линейными разъединителями.

Несимметрия, появляющаяся при разрыве фазы, оказывает значительное влияние на работу релейной защиты. Это вызывает необходимость, в целях обеспечения селективности защит, выполнять их таким образом, чтобы они по принципу действия и по параметрам срабатывания были отстроены от токов и напряжений неполнофазного нагрузочного режима. Вместе с тем, должна быть обеспечена чувствительность защит при коротких замыканиях, которые могут возникать при работе линии в НФНР [1].

На рисунке 1 представлена схема электропередачи одноцепной ВЛ 110 кВ с односторонним питанием, работающей в неполнофазном нагрузочном режиме.

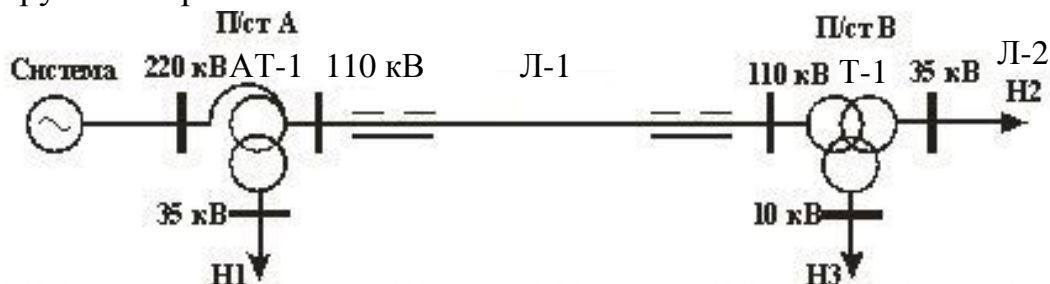


Рисунок 1 – Схема электропередачи при отключении с двух сторон фазы ЛЭП 110 кВ

На схеме установлены следующие защиты:

1. Автотрансформатор АТ-1: токовая защита обратной последовательности с приставкой от симметричных КЗ 220 кВ; защита от неполнофазного режима масляного выключателя АТ 220 кВ; МТЗ-35 кВ с блокировкой по напряжению; блокировка РПН; защита от перегрузки 220 кВ; защита от перегрузки 35 кВ; дифференциальная защита АТ; защита от замыкания на землю на стороне 220 кВ; защита от замыкания на землю на стороне 110 кВ; дистанционная защита ПЭ-2105; блокировка при качаниях; АПВ 110 кВ; АПВ 35 кВ;
2. Линия Л-1: дистанционная защита ЭПЗ-1636; блокировка при качаниях; защита от замыкания на землю на стороне 110 кВ; МТО; АПВ 110 кВ
3. Трансформатор Т-1: дифференциальная защита; максимальная токовая защита 110 кВ; максимальная токовая защита 35 кВ; максимальная токовая защита 10 кВ; защита от перегрузки 110 кВ; защита от перегрузки 10 кВ; АПВ 35 кВ
4. Линия Л-2: МТО; МТЗ; АПВ 35 кВ.

При осуществлении НФНР в сети появляются токи обратной и нулевой последовательностей, на которые могут ложно реагировать дистанционные защиты от междуфазных коротких замыканий, токовые защиты нулевой последовательности от КЗ на землю, защиты обратной последовательности. Кроме того, при передаче в НФНР максимальной мощности повышаются токи в неотключенных фазах, по сравнению с токами, протекающими при передаче той же мощности в полнофазном режиме. По этой причине возможно срабатывание максимальных токовых защит.

Анализ поведения релейной защиты показал, что для надежного несрабатывания защит в неполнофазном нагрузочном режиме необходимо выводить из работы IV ступень защиты от замыканий на землю



ВЛ 110 кВ. При передаче по ВЛ, работающей в НФНР, максимальной допустимой мощности возможно также срабатывание максимальной токовой защиты трансформатора Т-1. Поэтому предложено увеличить уставку МТЗ, принимая при расчете уставки в качестве рабочего максимального тока ток наиболее загруженной фазы при работе ВЛ 110 кВ в НФНР. Чувствительность защиты при этом оказывается достаточной как при работе линии Л-1 в нормальном нагрузочном режиме, так и в НФНР.

Для проверки работы релейной защиты были выполнены расчеты необходимых видов коротких замыканий в сети при НФНР ВЛ 110 кВ, которые показали, что при неполнофазном режиме работы ВЛ обеспечивается селективность и достаточная чувствительность оставшихся в работе защит. Причем оставшихся защит достаточно для надежного отключения оборудования при любых повреждениях в схеме.

Величина мощности, которую возможно передать по ВЛ в этой схеме ограничивается максимально допустимым током, протекающим по нейтрали трансформатора приемной подстанции. Для контроля за передаваемой мощностью обычно используются двухэлементные ваттметры, включенные по схеме Арона, которые при НФНР ЛЭП дают большую погрешность измерений [2]. Возникает опасность перегрузки нейтрали трансформатора.

Для исключения этой опасности рекомендуется установить защиту от перегрузки нейтрали трансформатора токами нулевой последовательности, действующую на сигнал. Реле такой защиты можно подключить либо к вторичной обмотке трансформатора тока установленного в цепи нейтрали, либо к вторичным обмоткам трансформаторов тока 110 кВ, соединенных по схеме фильтра токов нулевой последовательности. Ток срабатывания защиты определяется [3],

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot (I_{нб} + 3I_0). \quad (1)$$

Кроме того, в этой цепи следует установить амперметр для контроля величины тока в нейтрали трансформатора. При срабатывании защиты необходимо осуществлять разгрузку трансформатора, отключая потребителей, пока ток в нейтрали не станет меньше допустимого. Максимальное допустимое значение тока в нейтрали трансформатора при НФНР питающей линии равно номинальному фазному току обмотки ВН трансформатора [4]. В цепи данной защиты следует установить накладку и вводить ее в действие только при осуществлении НФНР ВЛ 110 кВ.

При неполнофазном режиме ВЛ 110 кВ выводились из работы устройства АПВ 110 кВ на АТ-1 и линии Л-1 подстанции А, АПВ 35 кВ на Т-1 и линии Л-2 подстанции В. Для определения возможности автоматического повторного включения ВЛ, работающей в неполнофазном нагрузочном режиме, предполагается провести дополнительные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Методические указания по расчету, экспериментальной проверке и переводу ВЛ 110 и 220 кВ с односторонним питанием в неполнофазный нагрузочный режим. – М.: Союзтехэнерго, 1980.
2. Мисриханов М.Ш., Рагозин А.А., Попов В.А., Кушкова Е.И., Александров В.Ф., Мокеев С.Ф. Экспериментальное исследование неполнофазных режимов работы оборудования//Вестник Ивановского государственного энергетического университета. Выпуск.3– Иваново: ИГЭУ, 2003. – С. 69-81.
3. Руководящие указания по релейной защите. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчеты. Выпуск 13Б. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. ГОСТ 11677-89 (1999). Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

Научный руководитель: Е.И. Кушкова, к.т.н., доцент кафедры Электрические станции Вятского государственного университета.

### **СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА АДАПТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ И ЧАСТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ КАК ЭЛЕМЕНТА ПОСТРОЕНИЯ SMART-GRID**

Н.А. Беляев, Ю.В. Хрущев  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ

Современная концепция развития энергосетевого комплекса подразумевает постепенный целенаправленный переход от существующей формы функционирования единой национальной энергетической системы к интеллектуальной активно-адаптивной сети – SMART-grid [1]. Такой переход подразумевает разработку и внедрение новых технологий, направленных как на повышение качествен-

ных и количественных характеристик традиционных аспектов функционирования энергосетевого комплекса, так и на обеспечение его новых свойств. К последним, в частности, относится свойство самовосстанавливаемости энергосистем (ЭЭС) [2].

Синтез устройств, соответствующих концепции SMART-grid, подразумевает разработку адаптивных систем управления электрическими машинами и другими объектами ЭЭС. К одной из таких разработок можно отнести устройство адаптивной синхронизации генераторов и частей энергосистем, разрабатываемое в Энергетическом институте Томского политехнического университета [3]. Предложенный подход отличается тем, что в отличие от существующих устройств обладает формализованной процедурой одновременного перевода параметров относительного движения векторов напряжения синхронизируемых объектов (относительного ускорения  $\alpha$ , относительной скорости  $v$  и относительного угла  $\delta$ ) к нулевым значениям, что достигается путем создания эталонной модели генератора или части энергосистемы. В данной задаче эталонная модель может быть представлена программной траекторией движения (ПТД) для параметров синхронизации, обеспечивающей их плавное подведение к нулевым значениям (рис. 1).

Учитывая ограниченные возможности аппаратной реализации алгоритмов, на данном этапе в качестве базовых функций, удовлетворяющих ряду рациональных требований (таких как знакопостоянство управляющих воздействий и др.) для построения ПТД приняты постоянное ускорение – равноускоренное движение (рис.1, а) и линейно убывающее ускорение (рис.1, б).

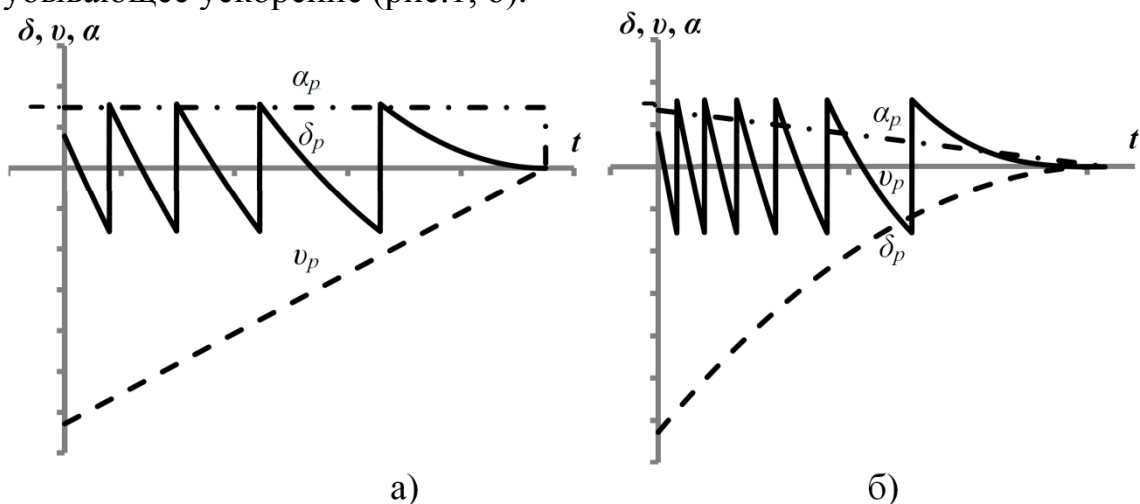


Рис. 1. Примеры построения ПТД

Управление с эталонной моделью подразумевает наличие двух этапов: на первом этапе производится формирование эталонной модели в виде ПТД, а на втором – обеспечение движения согласно постро-

енной ПТД. При этом одной из важнейших задач является компенсация возникающих в процессе управления отклонений параметров реального движения от ПТД.

Целью компенсации отклонений является обеспечение на всем интервале управления равенства:

$$\alpha(t) = \alpha_p(t), \quad (1)$$

где  $\alpha(t)$ ,  $\alpha_p(t)$  – соответственно, реальное и программное значения относительного ускорения в момент времени  $t$ .

В случае, если равенство (1) будет выполняться на всем интервале управления, параметры  $v(t)$ ,  $\delta(t)$  реальной траектории будут равны соответствующим параметрам ПТД:

$$\begin{aligned} v(t) &= v_p(t), \\ \delta(t) &= \delta_p(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Однако, как только равенство (1) будет нарушено, в силу дифференциальной связи

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3)$$

будут нарушены и равенства (2). Несмотря на то, что в течение некоторого интервала времени значение параметра  $\alpha(t)$  может быть произвольно и с высокой точностью возвращено к значению  $\alpha_p(t)$ , компенсировать возникшие отклонения  $v(t)$  и  $\delta(t)$  в общем случае не удастся (рис. 2). При этом, согласно (3), наличие отклонения относительной скорости в течение некоторого промежутка времени будет вызывать дальнейшее увеличение отклонения относительного угла. Для предотвращения этого явления необходимо введение компенсирующего воздействия, позволяющего выполнять согласованную компенсацию отклонений всех параметров.

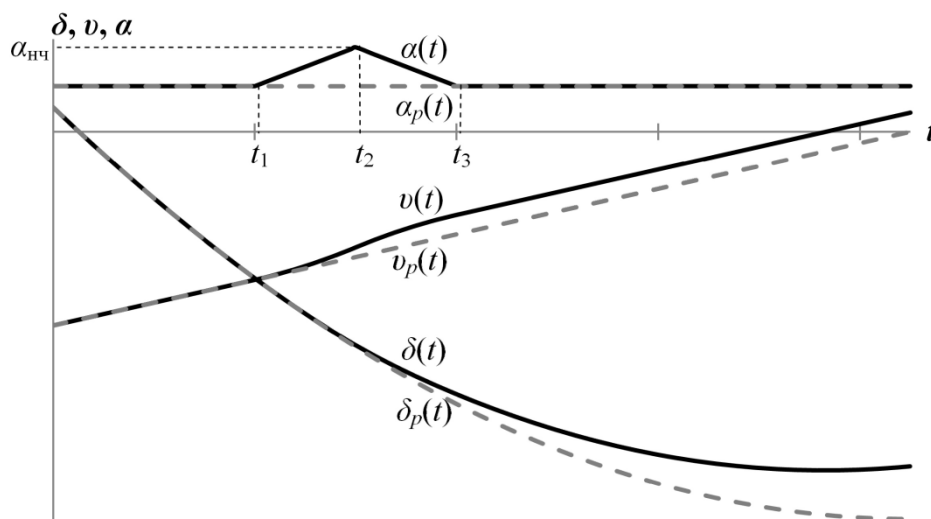


Рис. 2. Пример возникновения отклонений относительной скорости и относительного угла

В качестве такого воздействия принято управление, позволяющее обеспечивать возврат функции  $v(t)$  к  $v_p(t)$ . Суть этой операции заключается в том, чтобы компенсировать образовавшуюся разницу площадок между программной и реальной функциями относительного ускорения. С учетом (3), искомая площадь компенсации  $S_{\text{комп}}$  определяется как интеграл относительного ускорения на основании текущего значения относительной скорости  $v(t_3)$  и значения  $v_p(t_3)$ , соответствующего ПТД:

$$S_{\text{комп}} = v(t_3) - v_p(t_3) \quad (4)$$

Для алгоритма равноускоренного движения  $v_p(t_3)$  можно выразить через начальные значения  $v(t_0)$  и  $\alpha(t_0)$ :

$$v_p(t) = \alpha(t_0)t + v(t_0) \quad (5)$$

На основании (4) и выбранной формы корректирующих управляющих воздействий производится определение относительного ускорения  $\alpha_{\text{комп}}$ , которое необходимо обеспечить для компенсации отклонений. Например, для случая V-образной формы корректирующих воздействий величина  $\alpha_{\text{комп}}$ , с учетом (5), определяется как

$$\alpha_{\text{комп}} = \alpha(t_0) - \frac{2S_{\text{комп}}}{t_5 - t_3} \quad (6)$$

Иллюстрация представленного случая приведена на рисунке 3.

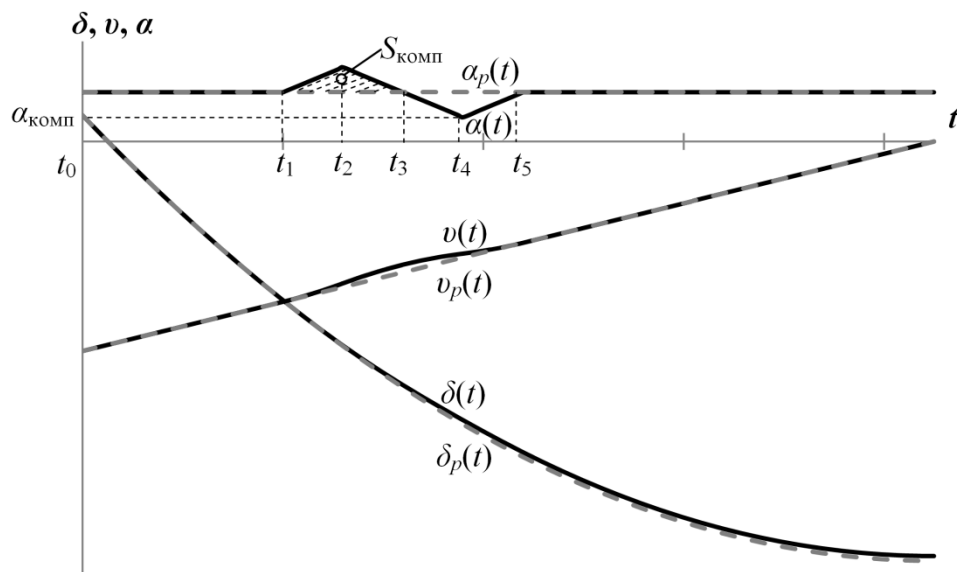


Рис.3. Компенсация отклонения траектории относительной скорости

Рассмотренный способ компенсации отклонений параметров режима позволяет обеспечивать возврат относительного ускорения и относительной скорости к ПТД, а также с высокой точностью обеспечивает возврат функции относительного угла. Более точная компенсация отклонений подразумевает использование более сложных алгоритмов, что в общем случае потребует выдачу корректирующих воздействий согласно нелинейной функции относительного ускорения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.10.2009 года № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года».
2. Кучеров Ю.Н., Федоров Ю.Г. Анализ условий развития интеллектуальных энергосистем // информационно-аналитический портал SmartGrid.ru [электронный ресурс], 2012.- Режим доступа: <http://www.smartgrid.ru/tochka-zreniya/intervyu/analiz-usloviy-razvitiya-intellektualnyh-energосistem/>.
3. Беляев Н.А., Хрущев Ю.В. Способ синхронизации возбужденной синхронной машины с сетью: пат. 2457597 Рос. Федерация. № 2011120883/07; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

Научный руководитель: Ю.В. Хрущев, д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

# УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ТУРБИН И ПРИНЦИПЫ ЕЁ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Н.А Волохов

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭКМ группа 5Г31

В настоящее время все производство, практически все распределение и большая часть потребления электроэнергии в энергосистемах выполняются на переменном токе. Поэтому параметры переменного тока — частота, величина и форма кривой напряжения — приобрели значение унифицированных параметров, в соответствии с которыми конструируются все источники, средства передачи и приемники электрической энергии. В особенности это относится к частоте. Практически сохранилось лишь два стандартных значения частоты — 50 Гц в странах Европы, в том числе в России, и 60 Гц в США и Канаде. В процессе работы энергосистемы все параметры переменного тока могут изменяться. Чем ближе они поддерживаются к номинальным, т.е. расчетным для оборудования, значениям, тем ближе режим к оптимальному. Таким образом, частота приобретает значение показателя, характеризующего качество продукции энергетической промышленности, качества электроэнергии. В Российских энергосистемах в нормальном режиме частота должна поддерживаться с точностью  $\pm 0,05$  Гц. Допускается кратковременная работа энергосистем с отклонением частоты в пределах  $\pm 0,2$  Гц.

Частота переменного тока непосредственно связана с частотой вращения агрегатов, преобразующих механическую энергию в электрическую, т.е. генераторов, и агрегатов, преобразующих электрическую энергию в механическую, т.е. двигателей. Изменение же частоты вращения, даже небольшое, существенно влияет на режим работы вращающихся механизмов. Снижение частоты приводит к падению производительности насосов и других механизмов. Примером механизма, предъявляющего весьма жесткие требования к точности поддержания частоты вращения, является паровая турбина. Турбостроительные заводы требуют, чтобы частота не оставалась длительно ниже 49,5 Гц и выше 50,5 Гц, иначе возможно повреждение лопаток турбин. Таким образом, серьезные требования к точности регулирования частоты предъявляются самими электростанциями.

Частота является не только показателем качества электроэнергии, но и важнейшим параметром режима энергосистемы. Непрерыв-

ность производства электроэнергии, отсутствие возможности запастись энергией и непрерывное изменение потребления требуют столь же непрерывного контроля за соответствием производства и потребления. Параметром, характеризующим это соответствие, и является частота.

Задача регулирования частоты решается с помощью регуляторов частоты вращения, которыми оборудуется каждая турбина на электростанциях энергосистемы. Эти регуляторы построены как система регулирования с обратной связью и её параметры выбираются таким образом, чтобы при изменении мощности турбины от нуля до номинальной, частота снижалась примерно на 5%. Такая характеристика системы регулирования турбины необходима для того, чтобы можно было обеспечить определённое распределение мощности между параллельно работающими агрегатами турбина-генератор. Однако при этом изменение мощности нагрузки энергосистемы, и соответственно изменение мощности турбин частота не остаётся постоянной. Для того, чтобы обеспечить постоянство частоты в таких условиях применяется дополнительно система вторичного регулирования частоты, сравнивающая фактическое значение частоты электрического тока с номинальным, и вырабатывающая воздействие на изменение заданного значения частоты в системе регулирования турбины.

В результате выполнения работы показано какими методами и техническими средствами обеспечивается регулирование частоты в энергосистемах. Также показана связь данной конкретной задачи с общими закономерностями в системах автоматического регулирования с обратной связью.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1969. 375с.
2. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. Веникова В.А., Строева В.А.. М.: Высшая школа, 1998.
3. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергетических специальностей вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985.

Научный руководитель: Р. А. Вайнштейн, д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ.



## **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЯЧЕЕК КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ**

Б.Е. Машрапов

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Как ранее отмечалось [1], наметилась тенденция к увеличению повреждаемости комплектных распределительных устройств (КРУ). Наиболее опасным видом повреждений являются дуговые замыкания, как однофазные, так и междуфазные. Предлагаемые устройства для защиты ячеек КРУ от этих повреждений обладают различными недостатками [2]. Например, устройства, основанные на контроле температуры в ячейке КРУ сложны в реализации и обладают малой чувствительностью [2]. Логическая защита шин [3] обеспечивает отключение дугового короткого замыкания без выдержки времени только в отсеках сборных шин ячеек КРУ, тогда как наиболее вероятным местом их возникновения является отсек трансформаторов тока и кабельной разделки [1]. Также предлагается [4] строить централизованную защиту ячеек КРУ от однофазных дуговых замыканий. При этом во вводных ячейках КРУ устанавливается по одному комплекту защиты от однофазных замыканий, а в каждой ячейке КРУ, отходящего от шин присоединения, два комплекта, получающих информацию от трансформаторов тока нулевой последовательности, установленных в линейном отсеке и отсеке сборных шин ячейки КРУ. Причем установка последнего является затруднительной. В данной работе предлагается защита [5], обеспечивающая быстрое отключение дуговых замыканий в отсеках трансформаторов тока и кабельной разделки ячеек КРУ.

Принцип действия защиты заключается в сравнении в блоке 1 (рис. 1) токов нулевой последовательности, измеренных со стороны выводов выключателя 2 группой трансформаторов тока 3, 4, 5 и со стороны кабельной воронки трансформатором тока 6 нулевой последовательности. Реле тока 9 блокирует работу защиты при однофазных замыканиях на землю в кабеле или в питаемом электрооборудовании.

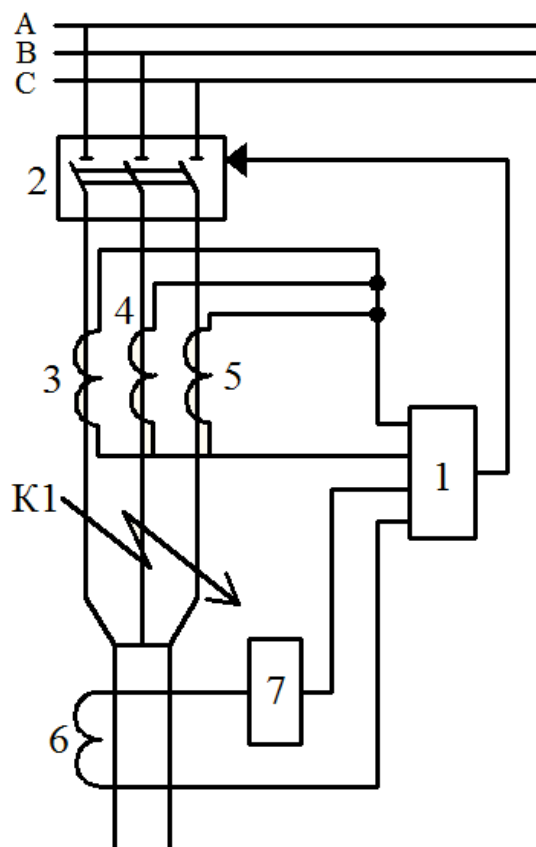


Рис. 1. Принципиальная схема устройства защиты ячеек КРУ от дуговых замыканий.

В качестве примера рассмотрим работу защиты при трехфазном коротком замыкании в точке К1 при отсутствии подпитки от электродвигателей. Так как тока со стороны нагрузки нет, то на входы блока 1 поступает только ток, протекающий по нулевому проводу группы трансформаторов тока 3, 4, 5. Реле тока 9 не срабатывает, следовательно, блокирующего сигнала нет. При этом ток, протекающий по блоку 1, превышает его уставку срабатывания. На его выходе появляется сигнал на отключение выключателя 2.

При однофазных замыканиях в защищаемой зоне по вторичной обмотке трансформатора тока 6 нулевой последовательности протекает только емкостной ток самого присоединения, а по нулевому проводу трансформаторов ток 3, 4, 5 весь ток однофазного замыкания на землю. Поэтому из разность превышает уставку срабатывания блока 1, и защита подает сигнал на отключение выключателя 3.

В остальных режимах работа защиты анализируется аналогично.

**Вывод.** Предложенная защита обеспечивает отключение дуговых замыканий в отсеках трансформаторов тока и кабельной разделки ячеек КРУ без выдержки времени.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Нагай В.И. Повышение технического совершенства релейной защиты распределительных сетей напряжением 6-10 кВ электроэнергетических систем: Дис...д-ра техн. наук.
2. Нагай В.И., Сарры С.В., Луконин А.В. Быстродействующие релейные защиты высоковольтного оборудования корпусной конструкции с датчиками электрических и неэлектрических величин. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции. - М.: Научно-инженерное информационное агентство.– 2009.-С. 425-431.
3. А.с. 1644287 СССР, МКИ<sup>5</sup> H02H7/26 Устройство для централизованной токовой защиты сети / Г.Е. Болгарцев, М.Я. Клецель, К.И. Никитин, В.М. Шатохин (СССР). - №4352486/07, опубл. 23.04.91, бюл. №15 - 3 с.: ил.
4. Манилов А.М., Барна А.А. Защита от дуговых замыканий на землю комплектного распределительного устройства 6- 35 кВ// Промышленная энергетика.- 2011.- №8.- С. 7-8.
5. А.с. 75457 KZ, H02H7/22 Способ защиты ячеек комплектных распределительных устройств от дуговых замыканий / М.Я. Клецель, В.Н. Горюнов, Б.Е. Машрапов, К.И. Никитин. - №23306, опубл. 15.10.12, бюл. №10 - 3 с.: ил.

Научный руководитель: М.Я. Клецель, д.т.н., профессор, кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСОВ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин, Г.С. Шабалин, А.В. Паздерин  
Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

Построение современных электрических сетей предполагает совершенствование методов управления энергосистемой. На сегодняшний день, автоматика регулирования возбуждения генератора является основным инструментом по поддержанию требуемого уровня напряжения в энергосистеме, а также оказывает существенное влияние на пропускную способность и устойчивую работу ЭЭС. Применяемые сегодня регуляторы возбуждения сильного действия имеют значи-

тельное количество настраиваемых параметров. При их неправильном выборе, АРВ СД может послужить причиной нарушения устойчивой работы в результате перерегулирования, потому правильный выбор настроек имеет важнейшее практическое значение.

Традиционные методы настройки АРВ основываются на анализе линеаризованной системы дифференциальных уравнений, а наиболее распространенный метод  $D$ -разбиения хорошо применим для настройки регулятора с одним или двумя параметрами. Настройка регуляторов возбуждения с большим числом параметров производится, как правило, эмпирически [1]. Поэтому разработка подходов к настройке регуляторов возбуждения является важной задачей, особенно с точки зрения построения интеллектуальных энергосистем.

В данной статье предложена методика настройки регулятора возбуждения сильного действия по линеаризованной модели энергосистемы с применением методов оптимизации для поиска параметров регулятора. Данный метод основан на анализе положения полюсов линеаризованной модели. Схожий подход, но на основе идентифицированной модели представлен в [2].

Для анализа электромеханических переходных процессов использовалась одномашинная модель энергосистемы, созданная в пакете Simulink ПО Matlab, Данная модель включает в себя стандартные элементы библиотеки SimPowerSystem.

Модель регулятора возбуждения сильного действия сформирована на основе описания, изложенного в [3]. Структурная схема представлена на рисунке 2.

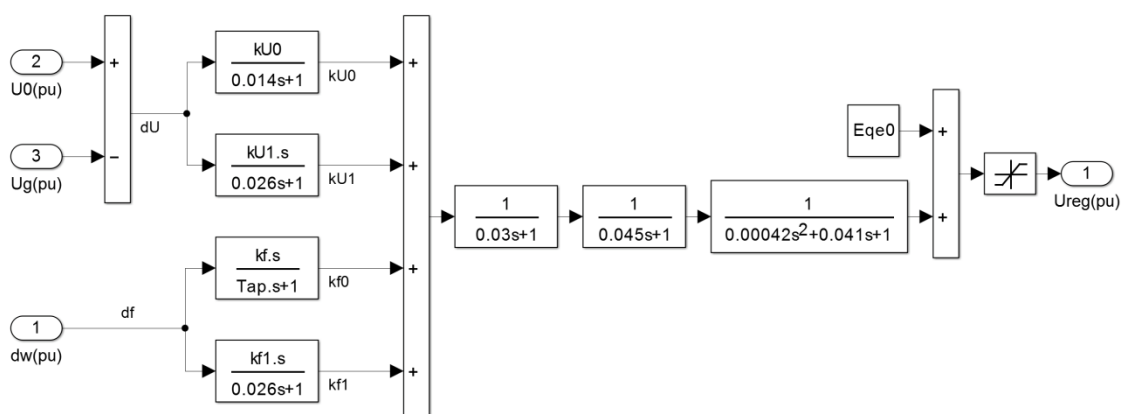


Рис. 1. Структурная схема блока АРВ СД

Из теории устойчивости известно, что устойчивость динамической системы можно оценить по положению собственных чисел матрицы частных производных системы дифференциальных уравне-

ний[4]. Действительные части комплексно-сопряженных корней определяют декремент затухания, а мнимые части - частоту колебаний. Из этого можно заключить, что чем больше по модулю действительные части корней, тем быстрее затухают колебания в системе. Соответственно, настройки регулятора возбуждения должны обеспечивать наибольшее смещение собственных чисел матрицы состояния в левую часть комплексной плоскости. Необходимо отметить, что в данной постановке задачи, собственные числа матрицы состояния являются полюсами модели системы.

Для созданной модели энергосистемы вычислялась линеаризованная модель для точки установившегося режима. Настройки регулятора возбуждения, являясь частью модели в том или ином виде, являются частью матрицы состояния. Таким образом, изменяя настройки и получая новую линеаризованную модель, можно добиться изменения значений коэффициентов матрицы состояния и, соответственно, полюсов системы.

С помощью алгоритма непосредственного поиска[5] определялись такие параметры, при которых значение целевой функции:

$$\min J = \max_i \frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2}}, \quad (1)$$

где  $J$  – значение целевой функции;  $\alpha_i, \omega_i$  – действительная и мнимая часть  $i$ -ого собственного числа; принимало наименьшее значение. При определении значения целевой функции производился отбор собственных чисел, соответствующих низкочастотным электро-механическим колебаниям в интервале от 0,2 до 2 Гц.

В качестве первого приближения были выбраны усредненные настройки АРВ СД. Сравнение поведения системы при начальных настройках и полученных на выходе оптимизационного алгоритма, производилось на примере реакции системы на изменение уставки регулятора возбуждения по напряжению на 5%.

В соответствии с теоретическими положениями, изложенными в [4], данное смещение полюсов системы оказало влияние на демпфирующие свойства системы. На рисунке 2 представлена комплексная плоскость, на которой показаны положения полюсов системы при начальных настройках и рассчитанных.

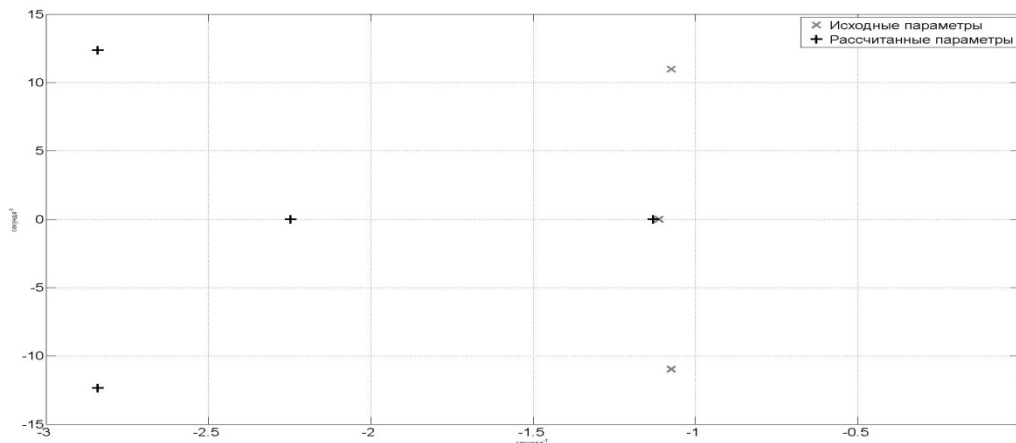


Рис. 2. Расположение полюсов

На рисунке 3 представлены кривые изменения частоты в моделируемой энергосистеме для указанного возмущения. Как видно из предложенных кривых, демпфирующие свойства системы улучшились.

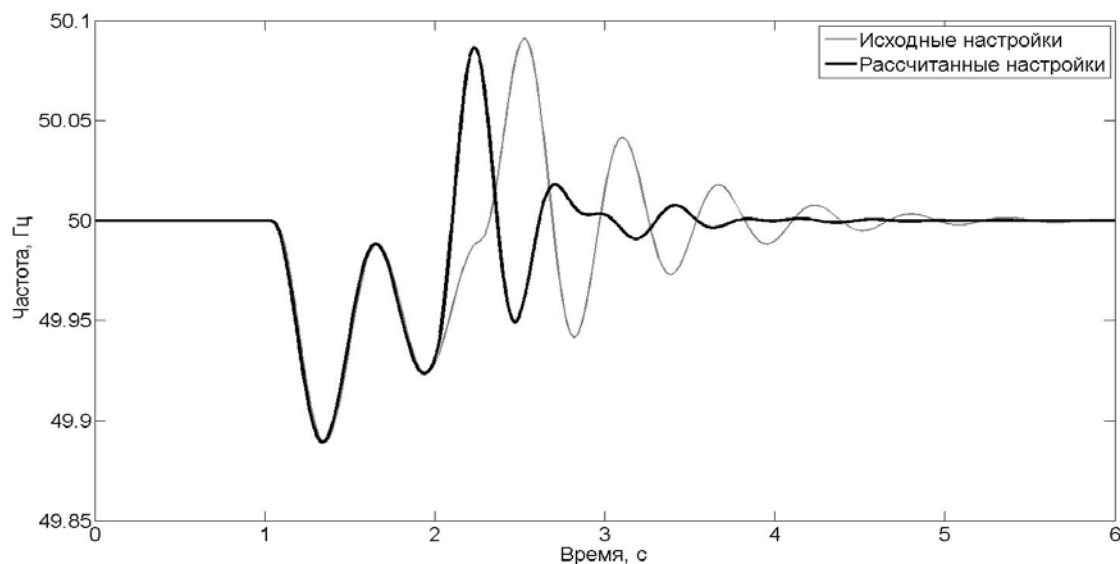


Рис. 3. Кривые изменения частоты

В данной статье показаны результаты настройки автоматического регулятора возбуждения сильного действия по линеаризованной модели энергосистемы. Как видно из предложенных рисунков, в результате поиска минимума целевой функции, происходит определение таких параметров, при которых коэффициент демпфирования электромеханических колебаний принимает наибольшее значение. Это соответствует смещению полюсов линеаризованной системы вправо. Данное смещение отражается на реакции системы на возмущение. Как видно из рисунка 3, при рассчитанных параметрах повышаются демпфирующие свойства системы. В качестве исходных данных для работы алгоритма предполагается замена линеаризованной модели на идентифицированную в соответствии с методами, изложенными в

[6,7]. Что позволит в перспективе настраивать АРВ СД для текущей режимной ситуации в реальном времени, что позволит увеличить пропускную способность энергосистемы, повысить ее эффективность, сохранив или повысив ее устойчивость. Таким образом, может быть получена адаптивная система управления, которая в полной мере соответствует понятию «интеллектуальной энергосистемы».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Армеев Д.В., Михеев А.В., Чеходанских А.В. Расчет параметров АРВ синхронного генератора методом модальной оптимизации. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – №2(64) – 105-116
2. Masayuki Watanabe, Takanori Izumi, Takuhei Hashiguchi, Yasunori Mitani An approach for tuning of power system stabilizers based on the wide area phasor measurement // 15<sup>th</sup> PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
3. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.: ил.
4. Kundur P. Power system stability and control, McGraw-Hill Inc, 1994.
5. patternsearch Matlab 2013a Help.
6. Chusovitin P.V. Transient prediction and small-signal stability analysis using PMU-based power system identification // AsiaPES 2012, Phuket, Thailand, 2-4 April 2012.
7. Chusovitin P.V., Pazderin A.V. Implementation of power system model identification for locating in-phase generators // Proceedings of 3<sup>rd</sup> IEEE PES ISGT Europe, Berlin, 2012.

Научный руководитель: А.В. Паздерин, д.т.н., профессор, ведущий кафедрой автоматизированные электрические системы УралЭНИН УрФУ.

### **3. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

#### **ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «СИРЕНА» – ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Д.Н. Баклай

Национальный технический университет  
Харьковский политехнический институт

Необходимость создания и использования интеллектуальных систем в задачах технико-экономической оценки состояния высоковольтного электротехнического оборудования в энергетике вызвана не только широким внедрением информационных технологий в производство, но и еще целым рядом причин. Возросли требования к эффективности, оперативности управления и организации процесса эксплуатации оборудования, обострилась необходимость автоматизации процессов сбора информации. Кроме того, электронные хранилища информации позволили бы избежать частичной потери и искажения ценной диагностической информации об оборудовании и его состоянии, которые могут происходить в условиях реструктуризации, видоизменении функций и структуры энергокомпаний и их подразделений, и даже при работе на одних объектах специалистов разных подразделений (эксплуатации, ремонтных и диагностических организаций). Таким образом, создание информационно-аналитических систем (ИАС), осуществляющих накопление и обработку критериев и правил, а также проводящие достоверную, многоаспектную оценку технико-экономического состояния оборудования с использованием не только регламентируемых, но и новых методов и критериев оценки, которые повышают оперативность и качество организации технического обслуживания оборудования и способствуют обучению персонала, является актуальной задачей.

В настоящее время на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» проводится активная разработка и адаптация под энергосистемы Украины информационно-аналитической системы «СИРЕНА».

ИАС «СИРЕНА» имеет многооконный объектно-ориентированный интерфейс. Система может работать на локальном компьютере и в сетевом режиме в локальной сети предприятия. Базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) различных узлов синхронизируются с



помощью механизма репликации [1]. Между узлами передаются только специальные файлы с изменениями. Система обеспечивает хранение

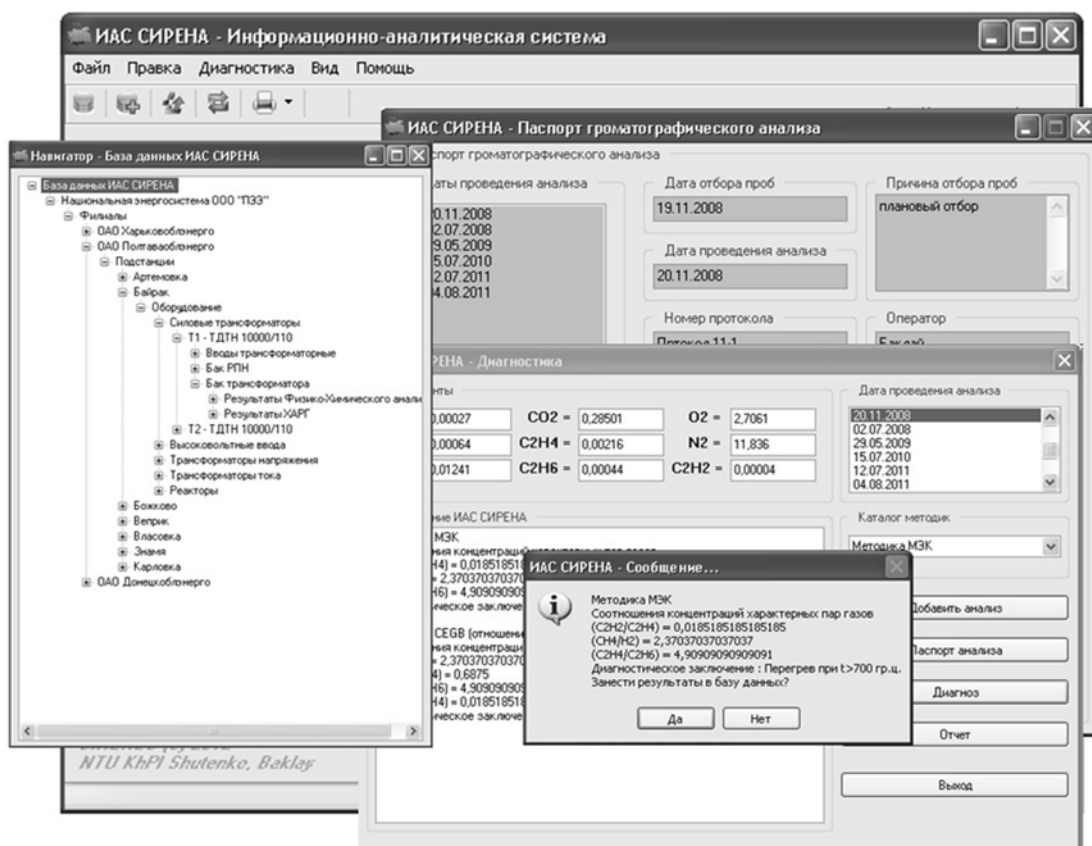


Рис. 1. Общий вид диалоговых окон ИАС «СИРЕНА»

ние информации в таблицах реляционных баз данных (БД) и вызов программ для отдельных записей (строк) этих таблиц.

Для обеспечения быстрого и удобного поиска информационных объектов используется специально разработанный модуль «Навигатор». Навигатор – это древовидная структура, состоящая из информационных объектов, связанных между собой ассоциативными связями. Просмотр и редактирование информационных объектов обеспечивается универсальной программой, которая данные из таблиц баз данных подставляет в диалоговые формы, что упрощает работу специалиста с большим набором данных.

Функциональные возможности ИАС «СИРЕНА»:

- ввод и хранение паспортных данных оборудования;
- ввод и хранение данных измерений и испытаний оборудования;
- ввод и хранение данных о режимах эксплуатации оборудования;

- ввод и хранение в базе данных информации об аварийных режимах работы электрических сетей и их параметров;
- ввод и хранение учета ремонтов оборудования;
- ввод и хранение нормативно-справочной базы данных;
- формирование и добавление в базу знаний новых правил, повышая тем самым «уровень интеллектуальности» системы;
- планирование и контроль за проведением регламентных работ;
- быстрый поиск актуальной информации в базах данных по запросам пользователей;
- оценка состояния функционирующего электрооборудования на основе результатов различных испытаний и измерений (по данным конкретного испытания или комплексную оценку по всем имеющимся данным);
- выдача рекомендаций по дальнейшей эксплуатации объекта, а также по составу и срокам проведения следующих испытаний и измерений;
- использование альтернативных методик испытаний при оценке состояния объекта (в частности ХАРГ и авторские методики);
- определение граничных значений контролируемых параметров на основе статистической обработки результатов.
- вывод на печать паспортных данных оборудования;
- формирование сводных протоколов по конкретным испытаниям за указанный период времени;
- формирование комплексного протокола по всем видам испытаний;
- протоколирование результатов испытаний и предложенных рекомендаций;
- графическая интерпретация результатов диагностических оценок объекта, а также динамики изменения состояния объекта и контролируемых параметров.

На данном этапе система обеспечивает проведение диагностики технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов и автотрансформаторов. В дальнейшем развитии за счет модульной структуры системы планируется расширить список подконтрольного оборудования до:

- масляных шунтирующих реакторов;
- масляных, вакуумных, воздушных и элегазовых выключателей;

- высоковольтных вводов;
- трансформаторов тока и напряжения.

Важным преимуществом ИАС «СИРЕНА» перед существующими аналогами является то, что при диагностике состояния оборудования используются не только методы, регламентированные в нормативной документации но и знания экспертов и авторские методики для:

- оценки достоверности результатов периодического контроля состояния трансформаторных масел;
- интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов;
- распознавания причин роста концентраций растворенных в масле газов;
- автоматического построения и распознавания образов дефектов;
- определения типичных концентраций растворенных в масле газов;
- оценки степени старения трансформаторных масел;
- количественной оценки эффективности методов сушки и регенерации масел;
- прогнозирования значений показателей трансформаторных масел.

Данные методы, интегрированные в единую информационно-аналитическую систему, позволяют значительно повысить достоверность результатов диагностики состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования.

Разрабатываемая система представляет интерес для энергокомпаний, т.к. позволяет систематизировать накопленные данные и дополнить их знаниями экспертов и в результате прогнозировать возможный срок службы оборудования с целью принятия предупредительных мер и продления срока работы объектов электроэнергетических систем.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Принципы построения баз данных в информационно-аналитической системе «СИРЕНА» // Вісник НТУ «ХП». - 2011. - N 41. - С. 15-22.
2. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Информационно-аналитическая система для диагностики состояния высоковольтного элек-

троэнергетического оборудования // Энергетика та електрифікація. - 2011. - N 8. - С. 32 - 41.

Научный руководитель: О.В. Шутенко, к.т.н., доцент, кафедры Передачи электрической энергии Национальный технический университет Харьковский политехнический институт.

## **ОСОБЕННОСТИ ТРЕКООБРАЗОВАНИЯ НА НАНОРАЗМЕРНОМ ПОРКЫТИИ $TiO_2$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА**

А.В. Лазукин<sup>1</sup>, О.А. Новодворский<sup>2</sup>, С.А. Кривов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический институт

<sup>2</sup> Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,  
г. Шатура

Исследования свойств поверхностных разрядов связаны не только с необходимостью их подавления в высоковольтных установках, где скользящие разряды приносят явный вред, но и с технологическими применениями этого явления. В любом проявлении развитие поверхностного разряда связано со свойствами диэлектрика, вблизи которого он проходит. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований образования и конверсии треков на поверхности диэлектрика, покрытого пленкой  $TiO_2$  толщиной 90 нм.

В работе [1] авторами приводились результаты исследований по сравнению интегральных характеристик поверхностного диэлектрического барьерного разряда в зависимости от состава диэлектрического барьера и наличия либо отсутствия нанометрового покрытия диоксида титана на барьере. Было показано, что наличие на поверхности барьера покрытия  $TiO_2$  толщиной в 90 нм приводит к увеличению выхода озона в сравнении с тем же барьером без покрытия. Стоит отметить, что на барьере из керамики на основе  $TiO_2$  выход озона превышает выход озона на других барьерах, рассматриваемых в исследовании, в том числе и барьерах с нанометровым покрытием  $TiO_2$ .

В данной работе исследовалось длительное воздействие разряда на поверхность нанометровой плёнки  $TiO_2$ . Экспериментальный стенд, схематично показан на рис. 1. Для получения однотипных изображений на поверхность барьера были нанесены прицельные маркеры в виде насечки на плазмогенерирующем электроде (ПГЭ) и барьере. Зона разряда засвечена посторонним источником для удале-

ния с фотографии зашумления. Высокое напряжение, частотой 14 кГц, приложено к ПГЭ, обратный электрод заземлен, диэлектрический барьер, выполненный из керамики ВК-94, толщиной 1 мм, закреплен на массивном медном радиаторе. Предварительно на барьер была осаждена плёнка  $\text{TiO}_2$  толщиной 90 нм. Импульсное лазерное осаждение пленок проводилось в вакуумной камере, откачиваемой турбомолекулярным насосом ТМН -500 до давления  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Для абляции мишеней использовалось излучение второй гармоники ( $\lambda = 532$  нм) Nd:YAG – лазера с модуляцией добротности (длительность импульса по полувысоте 15 нс, энергия в импульсе до 250 мДж, частота повторений импульсов 10 Гц). Пленки осаждались при температуре подложки  $T = 300$  °С. Осаждение осуществлялось в атмосфере молекулярного кислорода при давлении  $2 \times 10^{-2}$  Торр.

К образцу было приложено напряжение 1,8 кВ в течение 40 мин. После снятия напряжения на поверхности покрытия были обнаружены полосовые треки черного цвета, причем по мере удаления от края плазмогенерирующего электрода интенсивность цвета уменьшалась. Положение треков соответствовало

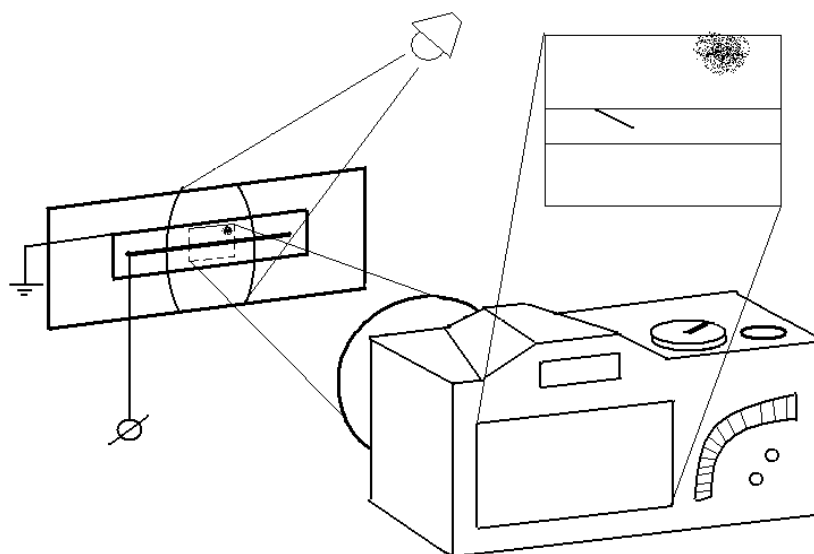


Рис. 1. Экспериментальный стенд.

положению каналов разряда. Треки распределились по поверхности не регулярно, имелись места, где треки под разрядом не образовались. При последующем приложении 1,8 кВ к образцу разряды зажглись на поверхности так, что их положение не совпадало и не пересекало треки. Далее к образцу в течение 2-х минут прикладывались напряжения 1,8; 2,1; 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,8; 3,0 кВ. После каждого 2-х минутного приложения образец выдерживался без напряжения 5 минут, и проводилось фотографирование развития треков. Суммарная наработка под

разрядом составила 1 час. Фотографии формирующихся на поверхности треков приведены на рис. 2. Указано время наработки покрытия в разряде до получения фотографии.

С увеличением кратности приложенного напряжения треки удлинялись и приобретали более насыщенный цвет. Большинство треков разветвлялись – можно выделить четкий «ствол» от которого брали начала более тонкие и менее яркие треки. Причем на определенном удалении от плазмогенерирующего электрода изменялось направление развития треков – они все более «загибались» - отклонялись от линии «ствола». Наличие треков в значительной степени изменило вид разряда по поверхности пленки, как уже было отмечено, разряды не пересекают треки – они занимают свободные места на поверхности и при напряжениях более 2,3 кВ появляются очаги разрядов берущих свое начало с конца линии трека. Так же над треками появляется свечение, повторяющее их основные очертания. Далее образец выдерживался без напряжения в атмосферном воздухе влажность 40% температурой 24 °С. После 20 часов выдержки произошло выцветание треков, и исчезновение их части наиболее удаленной от плазмогенерирующего электрода (рис. 3). После 60 часовой выдержки основная часть треков конверсировала.

На основании экспериментально установленного факта конверсии треков на поверхности плёнки и наличии у треков частичной проводимости можно сделать вывод о том, что их появление связано с обескислороживанием кристаллической решетки  $TiO_2$ . При выдержке в атмосферном воздухе, решетка насыщается кислородом, и треки обесцвечиваются, восстанавливая целостность плёнки.

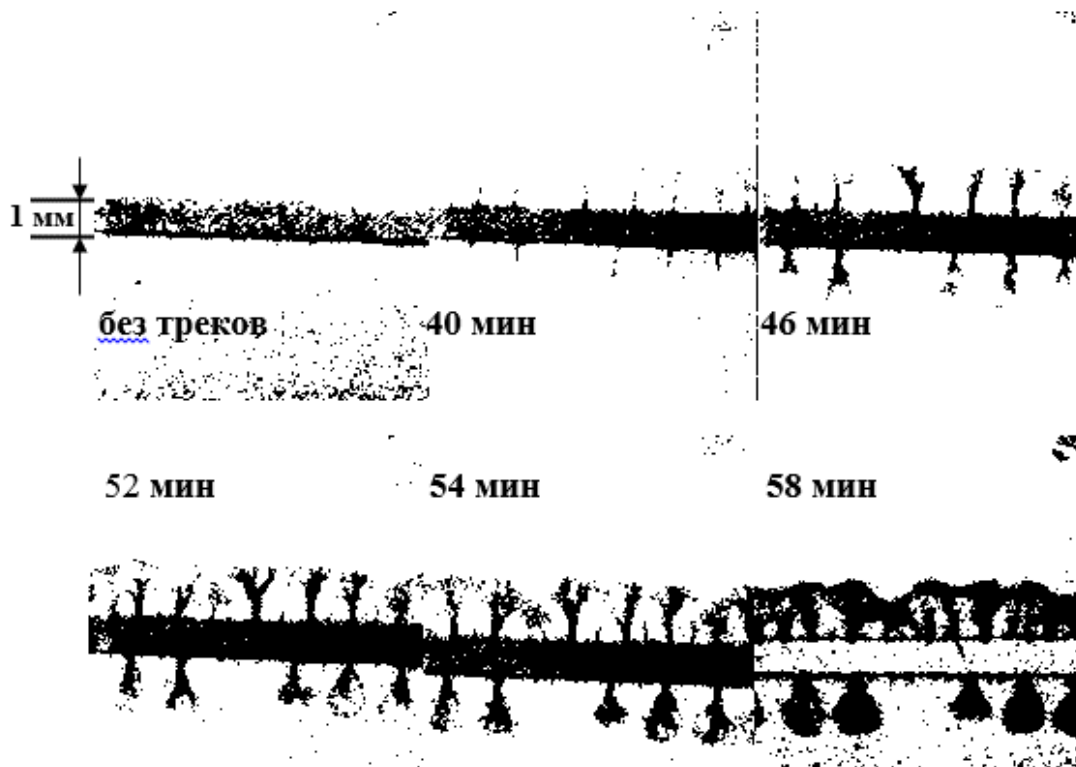


Рис. 2. Фотографии образования треков на поверхности плёнки TiO<sub>2</sub>



Рис. 3. Конверсия треков после 20 часов выдержки

Дальнейшие исследования будут направлены на установление связи между образованием треков на поверхности плёнки TiO<sub>2</sub> и повышением выхода озона.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8391 от 24 августа 2012 года

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазукин А.В., Кривов С.А., Зуев Д.А., Шорохова А.В., Новодворский О.А. Особенности поверхностного разряда по барьеру

еру с нанометровыми покрытиями  $TiO_2$ . Труды МКЭЭЭ-2012, Крым, Алушта 23-29 сентября 2012 г, стр. 10-12

2. "Взаимодействие поверхностного разряда в воздухе с плёнкой диоксида титана". Митин А.Н., Соколова М.В. М., Вестник МЭИ, Издательский дом МЭИ, №5, 2011 г., стр. 15-22.

Научный руководитель: С.А. Кривов, д.т.н., профессор, кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Институт электроэнергетики НИУ МЭИ.

## USWO-РЕГУЛЯТОРЫ. ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

Н.А. Аманжолова, В.С. Логинов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ

Для управления параметрами технологических процессов и установок наиболее широко применяются замкнутые системы автоматического регулирования. Их типовая структура представлена на рис.1.

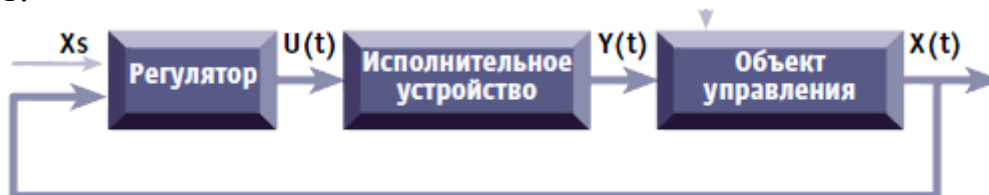


Рис.1. Типовая структура замкнутой системы автоматического регулирования

В подавляющем большинстве таких систем применяются регуляторы, реализующие классический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления.

Новый USWO-способ формирования управления, подобно ПИД-способу, формирует управляющее воздействие на основе информации о текущем состоянии объекта управления. По своему содержанию ПИД и USWO-способы принципиально отличаются друг от друга. В частности, первый является линейным, в то время как второй устанавливает знак и величину управляющего воздействия на основе переключения, представляющего собой нелинейное соотношение между компонентами вектора состояния объекта управления.

Способ USWO-формирования сигнала управления тесно связан с решением задачи оптимального управления с помощью принципа максимума Понтрягина. При создании модели регулятора физический



смысл и связь параметров ОУ с некоторыми параметрами регулирования получены с помощью анализа решения этой задачи оптимального управления. В результате получены выражения, описывающие работу USWO-регулятора (1):

$$\begin{cases} \varepsilon'_i = \varepsilon'_{i-1} + \frac{1}{T_{F1}} \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} - \varepsilon'_{i-1}); \\ \varepsilon''_i = \varepsilon''_{i-1} + \frac{1}{T_{F2}} \cdot (\varepsilon'_i - \varepsilon'_{i-1} - \varepsilon''_{i-1}); \\ \text{Sign}_i = \text{Sign}(\varepsilon_i + k_2 \cdot \varepsilon'_i \cdot |\varepsilon'_i| + k_3 \cdot \varepsilon'_i \cdot |\varepsilon'_i| \cdot \varepsilon''_i); \\ U_i = k_1 \cdot (|\varepsilon_i| + \sqrt{k_2} \cdot |\varepsilon'_i|) \cdot \text{Sign}_i; \end{cases} \quad (1),$$

где  $\varepsilon_i, \varepsilon'_i, \varepsilon''_i$  - ошибка регулирования, ее первая и вторая производные на  $i$ -ом шаге дискретизации соответственно;  $T_{F1}, T_{F2}$  - времена усреднения значений первой и второй производных;  $k_1, k_2, k_3$  - настраиваемые параметры регулирования. Параметр  $k_2$  имеет физический смысл половины квадрата постоянной времени. Параметр  $k_1$  имеет смысл коэффициента усиления замкнутой системы, но в связи с наличием релейного элемента в регуляторе влияние этого параметра не поддается анализу.

Принцип максимума в системах с переменной структурой Рассмотрим объект управления, описываемый дифференциальным уравнением (2):

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = k_x \cdot u \quad (2),$$

где на значение управляющего воздействия наложено ограничение  $|u(t)| \leq 1$ . В некоторый момент времени  $t_0$ , ОУ находится в состоянии  $x(t_0) = x_0, \dot{x}(t_0) = 0$ .

Требуется за минимальное время перевести ОУ в состояние, соответствующее

$$x(t_k) = 0, \dot{x}(t_k) = 0.$$

Применим к сформулированной задаче принцип максимума [Понтрягина]. Не нарушая общности задачи, будем считать  $t_0 = 0$ . Введем фазовые переменные

$$x_1 = x/k_x \quad \text{и} \quad x_2 = \dot{x}/k_x;$$

тогда рассматриваемое дифференциальное уравнение можно записать в виде системы

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases}$$

В этом случае получим задачу с фиксированными концами в начале:

$$\begin{cases} x_1(0) = x_0 / k_x \\ x_2(0) = 0 \end{cases},$$

в конце:

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 0 \end{cases}$$

Составим функцию Гамильтона-Понтрягина (3)

$$\mathcal{R}(x, u, \psi, \psi_0) = \psi_0 + \psi_1 \cdot x_2 + \psi_2 \cdot u \quad (3)$$

в которой  $\psi_0 = const$ , а  $\psi_1$  и  $\psi_2$  удовлетворяют сопряженной системе

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = 0 \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1 \end{cases}$$

Общее решение системы можно записать в явном виде

$$\psi_1(t) = C_1, \psi_2(t) = -C_1 \cdot t + C_2,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  - произвольные постоянные.

Найдем оптимальное управление  $u_*(x, t, \psi, \psi_0)$  из решения задачи

$$\max_{|u| \leq 1} (\psi_0 + \psi_1 \cdot x_2 + \psi_2 \cdot u),$$

откуда имеем

$$u^*(t) = \text{sign}(\psi_2(t)).$$

Следовательно, оптимальное управление является кусочно-постоянным, принимающим значения 1 или -1, и имеет, в силу линейности функции  $\psi_2(t)$ , не более одной точки переключения.

Подставим оптимальное уравнение, соответствующее оптимальному управлению  $u^*(t) = \text{sign}(\psi_2(t))$  в систему, в результате получим фазовую траекторию

$$x_1(t) = \begin{cases} -\frac{t^2}{2} + \frac{x_0}{k_x}, & 0 \leq t \leq t_1; \\ \frac{t^2}{2} - 2 \cdot t_1 \cdot t + t_1^2 + \frac{x_0}{k_x}, & t > t_1; \end{cases}$$

$$x_2(t) = \begin{cases} -t, & 0 \leq t \leq t_1; \\ t - 2 \cdot t_1, & t > t_1. \end{cases}$$

Из граничных условий находим время переключения  $t_1$  и оптимальное время стабилизации  $t_k$ .

В силу непрерывности фазовой траектории в точке  $t=t_1$

$$x_1'(t_k) = t_k - 2t_1 = 0 \Rightarrow t_k = 2t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{t_k}{2}. \quad (4)$$

И используя граничные условия находим оптимальное время стабилизации  $t_k$  с учетом (4)

$$x_1(t_k) = \frac{t_k^2}{2} - 2t_1 t_k + t_1^2 + \frac{x_0}{k_x} = 0 \Rightarrow \frac{t_k^2}{2} - 2 \frac{t_k}{2} t_k + \frac{t_k^2}{4} + \frac{x_0}{k_x};$$

$$x_1(t_k) = \frac{t_k^2}{4} - \frac{t_k^2}{2} + \frac{x_0}{k_x} = 0 \Rightarrow \frac{t_k^2}{4} = \frac{x_0}{k_x} \Rightarrow t_k = 2 \sqrt{\frac{x_0}{k_x}}.$$

Применяя метод конечных разностей для уравнения (1), получаем график изменения ошибки регулирования от шага дискретизации, при этом заметно что со временем ошибка регулирования стремится к нулю.

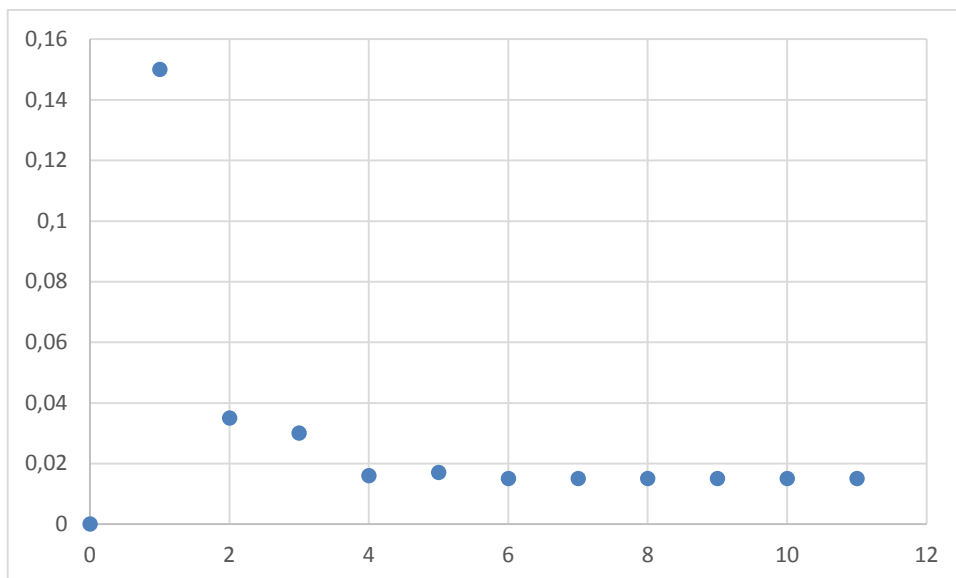


Рис. 2. График изменения  $\varepsilon(i)$

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бажанов В.Л. USWO-новый способ формирования управления для замкнутых систем автоматического регулирования // Разработки. Промышленные контроллеры.-1998.-N4.-С.28-32.

Научный руководитель: В.С. Логинов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ТПТЭНИН ТПУ.

### **СПОСОБ АЭРОДИАГНОСТИКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Д.Е. Лебедев

Новосибирский государственный технический университет

Проблема своевременного обнаружения дефектов ВЛЭП с последующим устранением для того, чтобы предотвратить незапланированное отключение линии, всегда была актуальной. А по причине большого износа электротехнического фонда такая работа «на предупреждение» имеет как прикладной интерес с точки зрения упрощения эксплуатации ВЛЭП, так и большой экономический эффект, обусловленный уменьшением расходов на замену оборудования, расходов на компенсацию потерь электроэнергии, а также уменьшением затрат на заработную плату обслуживающему и ремонтному персоналу.

Опыт эксплуатации показывает, что основными причинами отказа основных элементов ВЛ 35–500 кВ являются атмосферные, климатические и сторонние воздействия. Основными факторами, приводящими к нарушению работоспособного состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) и их повреждению, являются:

1. несоответствие проектных решений фактическим климатическим условиям;
2. неудовлетворительное техническое состояние элементов ВЛЭП;
3. неудовлетворительное состояние трасс ВЛЭП и прилегающих к ним лесных массивов [1].

В настоящее время существует несколько способов контроля ВЛЭП, призванных поддерживать работоспособное состояние линии, например:

1. пешие обходы линий;
2. объезды линий на авто- и мототранспорте;
3. облеты линий на вертолете;
4. диагностика линий с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

В нашей стране последний способ также получает развитие. Стоит отметить, что управление аппаратами осуществляется с помощью глобальных навигационных систем: GPS и ГЛОНАСС. Целью данного проекта является разработка нового способа, особенность которого состоит в том, что управление БПЛА происходит при помощи самой линии.

На БПЛА устанавливают измерительную аппаратуру: электромагнитный датчик высокочастотного излучения и АЦП. В ручном режиме располагают БПЛА под или над проводами ВЛ, выполненной на опорах порталного типа, и по радиоканалу включают устройство автоматического пилотирования, задавая расстояние до провода (высоту полета) величиной  $E_0$ . На концах крыльев устанавливают датчики измерения электрического поля. Измеренное на концах крыльев и усредненное по двум датчикам значение напряженности электрического поля  $E_{cp}$ , вводят в систему автоматического пилотирования летательным аппаратом, после чего сравнивают с величиной  $E_0$ . Более детально способ пилотирования описан в [2].

Как известно, линия электропередачи создает электромагнитное поле. Выше была освещена электрическая часть, но управлять аппаратом можно и с помощью магнитного поля.

Управление БПЛА с помощью магнитного поля аналогично управлению при помощи электрического поля. Процесс детально опи-

сан в [3]. Отметим лишь основную сложность при работе с магнитным полем – в отличие от напряжения, величина которого регламентируется ГОСТ 13109-97, и отклонение более 10% не допускается, ток в линии может изменяться в очень широких диапазонах, что влечет изменение пространственного положения БПЛА. Однако корректировать значение можно с помощью передачи на борт аппарата информации о текущем токе в линии.

Для передачи информации о токе, протекающем по ВЛ, может применяться высокочастотный (ВЧ) тракт линии, используемый для целей релейной защиты, автоматики и связи. Несущая частота ВЧ канала связи находится, как правило, в диапазоне 50...500 кГц. В связи тем, что волновая длина на этих частотах много меньше волновой длины на промышленной частоте, в некоторых точках ВЛ ток несущей частоты становится минимальным, и при низкой чувствительности по «токовому» ВЧ каналу БЛА становится неуправляемым. При отсутствии сигнала о токе линии может использоваться последнее измеренное значение.

Предполагаемая структурная схема аппаратуры для управления БПЛА и регистрации дефектов представлена на рисунке. Управление происходит с помощью системы автоматического пилотирования (АП), упрощенно показанной на рисунке. Диагностика основана на регистрации электромагнитного излучения разрядных процессов (ЭМИР), таких как коронный и поверхностный частичный разряды, создающих электромагнитный фон вблизи ВЛ с частотами 5...50 МГц. Сигнал ЭМИР принимается специальной антенной, после чего усиливается (К – рисунок), детектируется и передается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП – рисунок). К выходу АЦП подключается бортовой компьютер (БК), куда записывается полученная информация, а также видеоинформация и текущие координаты.

Обработка измерительной информации выполняется с помощью специального программного обеспечения, формирующего базы данных, удобные для анализа и принятия решений.

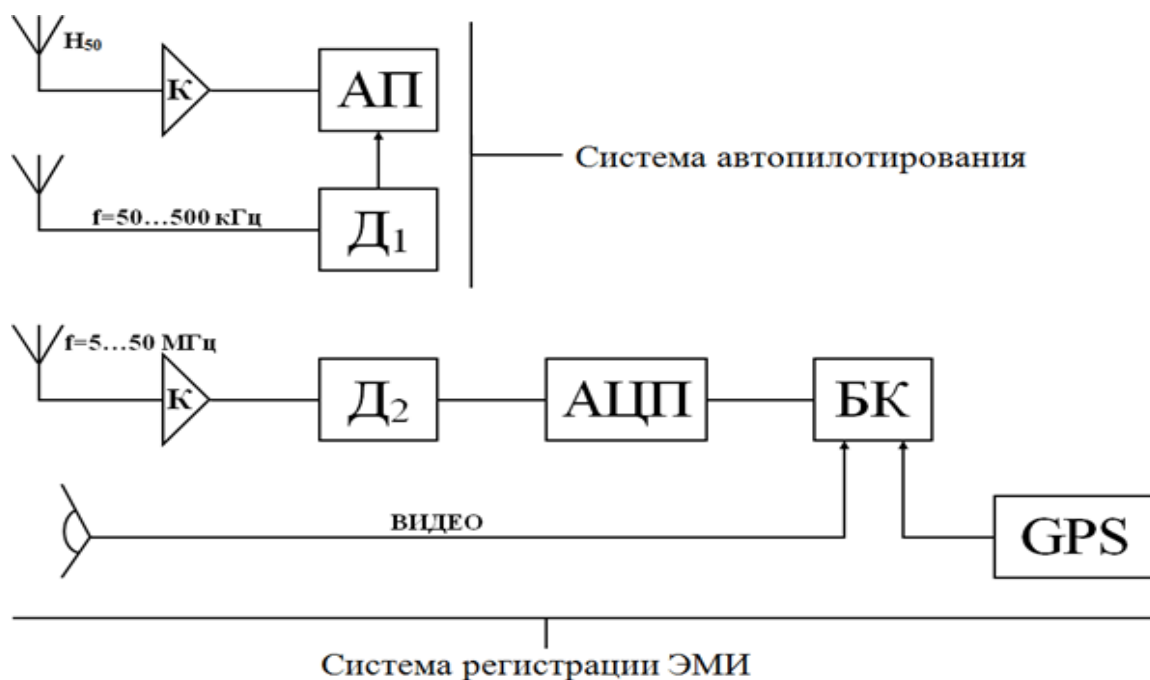


Рис. 1. Структурная схема управления и измерения

В соответствии с [4], наиболее важный параметр исследуемых импульсов – частота. Она находится в широких пределах от 0,15–1000 МГц. Наибольшая энергия всего излучения соответствует частоте, точное значение которой зависит от множества таких факторов, как конструкция опор, длина гирлянд изоляторов, атмосферные условия. В данном методе исследований частота импульсов или их длительность являются характерными параметрами. Именно в зависимости от значения частоты необходимо отталкиваться при выборе оборудования, с помощью которого будет проводиться исследование. В общем случае, частота или длительность импульсов будут зависеть от геометрических характеристик ВЛЭП. Исходя из этого, для более точной настройки оборудования, рекомендуется выполнять модели линий для разных изоляторов и разных типов опор. При этом для каждой модели необходима сверка с результатами, полученными при натуральных экспериментах. Необходимо создавать модели, которые будут имитировать одновременное воздействие нескольких факторов, что предотвратит ложное диагностирование дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. – Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.

2. Патент РФ № 2421746 (от 20.06.2011), МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // БИ № 17, 2011.
3. Патент РФ № 2483314 (от 18.11.2011), МПК G01R31/08. Способ аэродиagnостики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // БИ № 15, 2013.
4. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – С. 42-44.5.

Научный руководитель: В.Е. Качесов, д.т.н., профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета.

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

С.В. Гундарева, А.Г. Темников, И.Е. Калугина  
Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический институт

Современные методы расчета молниезащиты предполагают опережающее формирование встречных (восходящих) лидерных разрядов с молниеотводов, защищающих эти объекты от прямых ударов молнии. В то же время успешная работа молниеотводов не исключает формирования незавершенных разрядов с элементов конструкции защищаемого объекта в электрическом поле грозового облака и молнии. И в случае контакта этих незавершенных разрядов с взрывоопасными смесями, которые могут выбрасываться в атмосферу взрывоопасными объектами в различных технологических режимах, существует опасность взрыва таких смесей.

Известно, что формирование восходящего разряда проходит в несколько стадий: сначала возникает лавинная корона, которая может перейти в стримерную, которая, в свою очередь, может привести к образованию лидера. В случае лавинной короны выделяется энергия, не превышающая 0,01 мДж. Такая энергия способна привести к возгоранию лишь самых чувствительных взрывоопасных смесей. При стримерной форме разряда выделяемая в канале разряда энергия превышает 1 мДж, что достаточно для воспламенения большинства паро-, газо- и пылевоздушных взрывоопасных смесей [1].



Таким образом, для взрывоопасных зданий и сооружений контакт взрывоопасной смеси с каналом не только восходящего лидера, но и стримера способен вызвать взрыв. При защите таких объектов от ударов молнии необходимо решать одновременно несколько задач. Во-первых, обеспечить защиту от прямых ударов молнии молниеотводами с учетом возможности образования на объектах взрывоопасных областей и формирования обратных перекрытий между молниеотводом и защищаемым объектом. Во-вторых, существенно снизить вероятность формирования стримерных разрядов с объекта, которые смогут контактировать с образующимися вблизи него взрывоопасными областями. Т.е., при моделировании молниезащиты взрывоопасных объектов необходимо применять комбинированный критерий. Для элементов конструкции объектов, которые могут находиться в контакте с взрывоопасными областями, ключевым критерием возникновения опасного для объекта восходящего искрового разряда является формирование стримерного разряда (критерий K1 на рис. 1). При этом для молниеотвода, который должен защитить наземный объект от прямого удара молнии, или элементов конструкции объекта, не имеющих непосредственного контакта с взрывоопасной средой, ключевым критерием остается критерий возникновения восходящего лидера (критерий K2 на рис. 1).

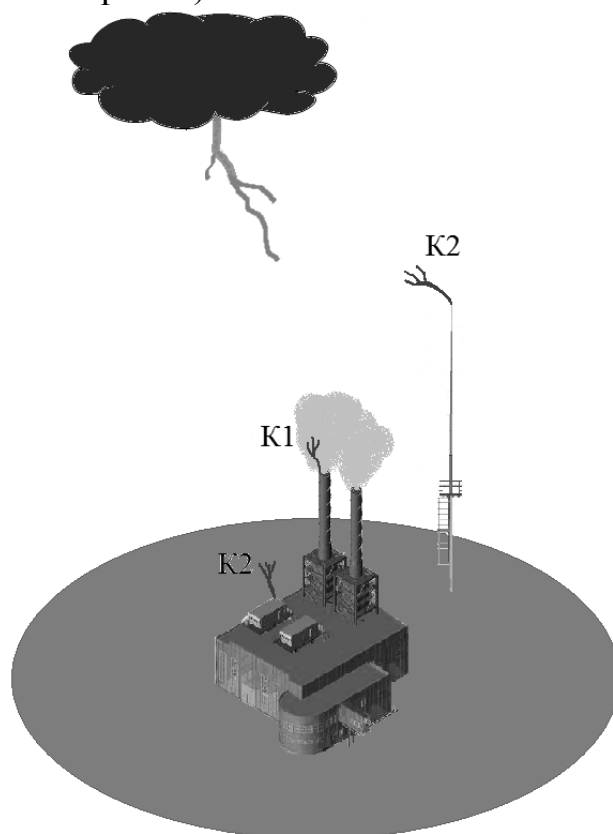


Рис. 1. К моделированию молниезащиты взрывоопасных объектов

В качестве критерия лавинно-стримерного перехода принято считать достижение напряженности электрического поля  $E_c$  на поверхности элемента конструкции объекта некоторого критического значения, которое можно найти из условия [2]:

$$\int_0^{L_{и}} \alpha_{эфф} dx \geq \ln(n_{кр}), \quad (1)$$

где  $\alpha_{эфф}$  – эффективный коэффициент ударной ионизации газа электронами;  $L_{и}$  – длина зоны ионизации;  $n_{кр}$  – критическое число электронов в лавине в момент ее перехода в стример.

Критическое число электронов определяется по формуле:

$$n_{кр} = \frac{36 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot (E_c - B \cdot \delta)^3}{e \cdot (\alpha_{эфф} \cdot E_c)^2}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $E_c$  – напряженность возникновения положительного стримерного разряда, кВ/см; для воздуха постоянная  $B = 24,5$  кВ/см;  $\delta$  – относительная плотность воздуха.

Решая совместно уравнения (1) и (2), находится необходимая для перехода лавины в положительный стример напряженность электрического поля при различных характеристиках элементов конструкции взрывоопасного объекта.

В качестве критерия возникновения лидера используется подход, предложенный во многих моделях возникновения лидера [3]. В его основе лежит положение, что лидер возникает, когда заряд импульсной стримерной короны превышает определенное пороговое значение (1 мкКл). Согласно [3], коронный заряд  $Q_{cor}$  пропорционален площади между графиками распределения потенциала в отсутствие вспышки импульсной стримерной короны на элементе объекта ( $U_1(l)$ ) и при ее формировании ( $U_2(l)$ ) на участке длиной  $l_s$  (рис. 2):

$$Q_{cor} = K_Q \int_0^{l_s} (U_1(l) - U_2(l)) dl, \quad (3)$$

где  $K_Q$  – геометрический коэффициент, учитывающий влияние всех стримеров на общий заряд (из экспериментов  $3,5 \cdot 10^{-11}$  Кл/(В·м) [3]).

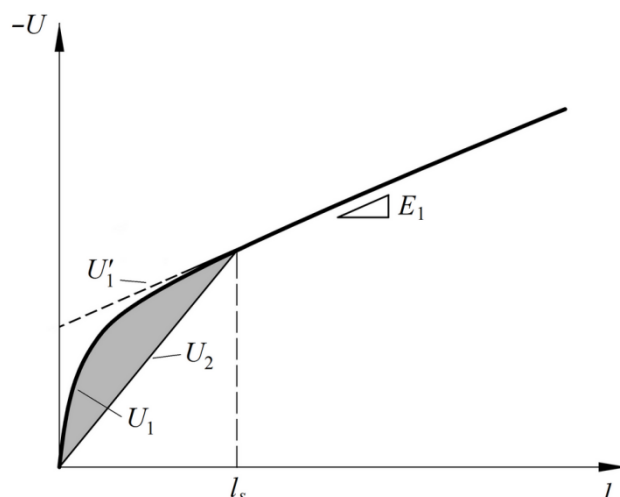


Рис. 2. К определению заряда вспышки стримерной короны

С учетом того, что значение средней напряженности электрического поля внутри образовавшейся стримерной зоны для положительных разрядов  $E_{str} \approx 500$  кВ/м, заряд вспышки импульсной стримерной короны  $Q_{cor}$  может быть приблизительно найден по формуле [3]:

$$Q_{cor} \approx K_Q \cdot \frac{l_s^2}{2} \cdot (E_{str} - E_1).$$

где  $E_1$  – наклон аппроксимирующей прямой  $U'(l)$  (рис. 2).

Эксперименты с использованием искусственных грозовых облаков также показали [4], что существенным фактором, влияющим на переход стримерной короны в восходящий лидер, является заряд вспышки импульсной стримерной короны  $Q_{cor}$ , протекший через ее основание. Однако, было найдено, что с ростом величины заряда стримерной вспышки более 0,8-1,2 мкКл наблюдается тенденция уменьшения вероятности ее перехода в восходящий лидер. На основании этих экспериментов в основу критерия возникновения восходящего положительного лидера заложен вероятностный подход, который учитывает, что при достижении заряда стримерной вспышки определенного значения переход в лидер может осуществиться лишь с некоторой вероятностью. Это отображает случайный характер изменения электрического поля, создаваемого грозовым облаком и/или нисходящим отрицательным лидером молнии, и возможную конкуренцию стримерных вспышек, формирующихся с различных элементов конструкции объекта и с вершины молниеотвода.

Таким образом, комбинированный критерий возникновения восходящих разрядов, основанный на вероятностном подходе, является новым для анализа риска повреждения взрывоопасных объектов в грозовых условиях и разработки нормативных документов по молниезащите взрывоопасных объектов различного вида.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.132.21.1803 и проект № 7.5072.2011).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Черкасов В.Н. Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества. М.: Стройиздат. 1984. – 80 с.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И. М. Бортник, [и др.]; Общ. ред. И. П. Верещагин . – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с.
3. V. Cooray. Lightning Protection (Power and Energy series). // The Institution of Engineering and Technology, 2009.
4. Темников А.Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 52-59.

Научный руководитель: А.Г. Темников, к.т.н., с.н.с., доцент НИУ МЭИ.

### **ВАРИАНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

Е.Н. Федосеенко

Национальный технический университет  
Харьковский политехнический институт

Эксплуатационный контроль электрических характеристик заземляющих устройств подстанций электрических сетей 110 кВ и ниже, выполненный рядом организаций (НИПКИ “Молния”, НТУ “ХПИ” и проч.) подтверждает наличие дефектов конструкций заземляющих устройств и несоответствие их параметров нормативным требованиям. Отмеченное несоответствие может стать причиной отказов заземляющих устройств, в первую очередь его функции электробезопасности. Параллельно с устранением дефектов заземляющего устройства появляется задача существенно улучшить электрические характеристики заземляющего устройства за счет простого, малорасходного, максимально механизированного технического решения, которое может быть реализованным в условиях действующей подстанции. К числу таких решений относится вариант использования элект-

тродов повышенной проводимости, предложенный научной группой кафедры “Передача электрической энергии” НТУ “ХПИ” [1].

Согласно [2] вертикальный электрод заземления повышенной проводимости растеканию с достаточной для практических расчетов точностью может быть замещен совокупностью из 12 вертикальных электродов различной длины, расположенных таким образом, чтобы глубина их погружения примерно соответствовала очертанию полуэллипсоида вращения с поверхностью равной поверхности цилиндра, ограниченного размерами скважины в грунте. Расчетные совокупности электродов, замещающих естественные сосредоточенные заземлители в двухслойной земле по равнозначным электрическим характеристикам, не обоснованы в работах [3, 4, 5].

Вертикальные электроды используют, если соотношение удельных сопротивлений слоев двухслойной расчетной модели земли  $\rho_1/\rho_2 > 0,8$  (при соотношении  $0,1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 0,8$  требуемое значение сопротивления заземлителя могут обеспечить только горизонтальные электроды). Длину вертикальных электродов целесообразно выбирать в зависимости от  $h$  по соотношению  $l_B \geq 2h$ , но не менее 5 м; здесь:  $h$  – мощность верхнего слоя,  $l_B$  – длина вертикальных электродов [3].

Целью настоящей работы является разработка электродов повышенной проводимости растеканию в соответствии с условиями действующей подстанции с целью достижения допустимых значений нормируемых параметров заземляющего устройства, а также подтверждение полученного варианта замещения вертикального электрода повышенной проводимости с помощью контрольного эксперимента.

Предложенные технические решения по выполнению вертикальных электродов заземления могут быть рекомендованы как вариант усовершенствования заземляющего устройства подстанций и электростанций, в том числе с целью доведения до нормируемых значений напряжения прикосновения при КЗ на территориях ОРУ на рабочих местах около оборудования.

Исследовательские испытания по диагностике состояния ЗУ ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ» [6] показали, что ЗУ выполнено с соблюдением требований к его сопротивлению, однако, в некоторых местах нарушено конструктивное выполнение заземлителя, обеспечивающее требования техники безопасности по напряжению прикосновения. Результаты выполненных расчетов [6] показали, что после проведения ремонтно-восстановительных работ для условий однофазного КЗ на территории ОРУ-110 кВ ПС значение напряжения прикосновения на рабочих местах у оборудования, на котором могут производит-

ся оперативные переключения, снизилось, но превышает допустимое значение.

Для обеспечения нормативных значений напряжения прикосновения, где оно превышает допустимые значения, в дополнение к рекомендациям [6] на ОРУ-110 кВ были выполнены два вертикальных электрода повышенной проводимости растеканию. В стороне от заземляющей сетки (минимальное удаление от периферийных горизонтальных электродов ЗУ 5,5 м) пробурены две скважины диаметром 0,33 м и глубиной 3 м, расстояние между которыми 5,1 м. В центр каждой скважины помещался электрод из стальной полосы 40x4 мм<sup>2</sup> длиной 2,5 м, причем один из электродов имел проводящее антикоррозионное покрытие. Засыпка скважин произведена гранулированным техническим углеродом марки П-803 производства ОАО «Стахановский завод технического углерода». Подсоединение вертикальных электродов повышенной проводимости растеканию выполнено медным изолированным проводом сечением 10 мм<sup>2</sup>. Смонтированные экспериментальные образцы электродов с 17.11.2008 г. находятся в опытно-промышленной эксплуатации.

Расчетные сопротивления растеканию электродов повышенной проводимости применительно к электрическим характеристикам грунта на территории ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ», которые определены в работе [7] и составляют: на глубине до 0,6 м – удельное сопротивление первого слоя равно 28 Ом·м и для второго слоя на глубине от 0,6 м – 35,5 Ом·м, в соответствии с разработанной в [2] методикой дает значение 6,8 Ом для каждого из электродов.

Сопротивление растеканию экспериментальных образцов электродов измеренное с использованием измерителя сопротивления заземления Ф4103-М1 (изготовитель – завод «Мегометр», г. Умань) составило:

- электрод без покрытия – 5,0 Ом;
- электрод с покрытием – 5,4 Ом.

Совместный анализ результатов исследовательских испытаний заземлителя ПС «Орджоникидзевская – 110 кВ» [6] и измерения сопротивления растеканию экспериментальных образцов электродов повышенной проводимости показали, что значения напряжения в тех местах ОРУ-110 кВ, где оно превышало допустимые значения, снизятся до значений меньших допустимых.

Действительно, имеем расчетное сопротивление ЗУ, учитывающее только искусственные заземлители, равное 0,31 Ом [6]; расчетное сопротивление экспериментальных электродов повышенной проводимости растеканию – 3,4 Ом и расчетное сопротивление системы

«трос-опора» двух присоединенных к ПС воздушных линий 110 кВ –  $|z_{вх}| = 1,6 \text{ Ом}$  (при  $\text{Re } z_{вх} > \text{Im } z_{вх}$ ). Тогда расчетное сопротивление ЗУ составляет 0,24 Ом.

Наибольшее расчетное значение падения напряжения на оборудовании при протекании имитационного тока 4,9 А в ЗУ составило согласно [6] 31,95 мВ; в пересчете на ток однофазного КЗ на ОРУ-110 кВ равный 12,02 кА при снижении расчетного значения сопротивления с 0,31 Ом до 0,24 Ом имеем наибольшее значение напряжения прикосновения 61 В, что меньше предельно допустимого значения 65 В при расчетном времени воздействия более 1,0 с.

Реализованный анализ результатов измерения и сопоставление их с рассчитанным значением подтвердили целесообразность внедрения предложенного технического решения. Разработанные вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию могут быть использованы при оптимизации конструктивных параметров заземляющего устройства на стадии проектирования и при доведении до допустимых значений нормируемых параметров заземляющего устройства действующих электроустановок.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Федосеенко О.М., Кисельов Є.Т., Мінченко А.А., Яровий В.М., Калінін Є.М. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій // Патент України №9874. Бюл.№10. 2005.
2. Федосеенко Е.Н., Минченко А.А. Вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию и их размещение при расчетах электрических характеристик сложных комбинированных заземлителей. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, – 2007. – №6/5(30) – С. 56-59.
3. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
4. Барбашов И.В., Пухкал В.А. Расчетные эквиваленты железобетонных фундаментов типовых подстанций ограниченной площади // Вестник Харьковского политехнического института, №169, “Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок”. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, - 1980. – Вып. 8. С. 56-58.
5. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства

подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – Киев: ИПМЭ, 2003. – Т.25. №2. С. 99-111.

6. Протокол исследовательских испытаний по диагностике состояния заземляющего устройства подстанции «Орджоникидзе» АК «Харковоблэнерго». – Харьков: НИПКИ «Молния» Харьков, 2006. – 14 с.
7. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №28 – С. 97-100.

Научный руководитель: А.А. Минченко, к.т.н., доц., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

М.С. Хмелик, С.С. Шевченко

Новосибирский государственный технический университет

При проектировании электрооборудования, часто возникает задача моделирования электромагнитного поля. Расчеты такого рода – задача достаточно трудоемкая. В основном, это связано с тем, что большинство объектов энергетики имеет сложную конструкцию, для которой просто невозможно получить аналитическое решение уравнений поля. Эта проблема частично решалась с применением различных методик расчета. Но, во-первых, поля сложной конфигурации по-прежнему не поддавались анализу, а, во-вторых, используемые допущения значительно снижали точность расчета.

Кроме того, существует класс задач, в которых необходимо проводить расчет характеристик электромагнитного поля при итерационном изменении физических или геометрических параметров модели. Примером таких вычислений являются задачи выбора оптимальной конструкции оборудования. В этом случае представляется логичным автоматизировать процесс, возложив расчет итерационных изменений параметров на вычислительную технику.





MATLAB. Последняя позволяла реализовать алгоритм циклического изменения толщины изоляции стресс-конуса.

Толщина изоляции изменялась с фиксированным шагом  $h = 2$  мм в диапазоне от 12-и до 2-х мм. Результаты расчета напряженности электрического поля представлены на рисунке 3.

По мере приближения границы к лепестку, напряженность поля по контуру A1-A2 увеличивается. Особенно сильно меняется поле над крайней точкой конуса.

Перебор всех возможных значений плохо подходит для решения оптимизационных задач, что ставит вопрос о том, как наиболее быстро и точно выделить искомую величину. Если ввести какой-либо критерий анализа, к примеру, напряженность поля в точке, можно использовать методы поиска. Для примера, воспользуемся методом равномерного поиска. Его главным преимуществом является простота, хотя он и не позволяет быстро найти оптимальное значение. Блок-схема метода представлена на рисунке 4.

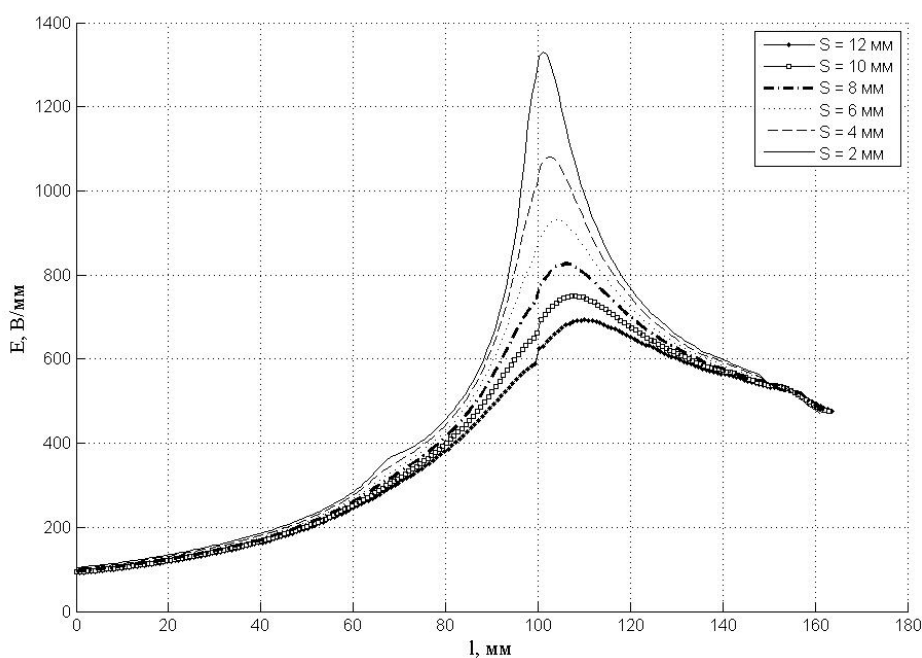
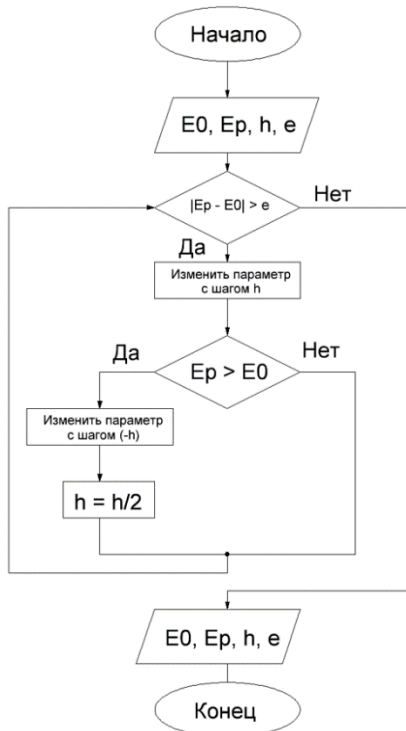


Рис. 3. Зависимость напряженности поля от толщины силиконовой изоляции



Где  $E_0$  – необходимая напряженность поля  
 $E_p$  – максимальная расчетная напряженность поля  
 $h$  – начальный шаг расчёта  
 $e$  – точность расчёта

Рис. 4. блок-схема метода равномерного поиска

Продemonстрируем работу алгоритма для решения обратной задачи - поиска необходимой толщины изоляции, при заданной напряженности поля.

Предположим, что максимально допустимая напряженность для силиконовой изоляции стресс-конуса  $E_{max} = 950$  В/мм. Выберем точность расчета  $\varepsilon = 9.5$  В/мм (1% от искомого значения), расчет выполняется согласно блок-схеме на рисунке 4, результаты представлены на рисунке 5.

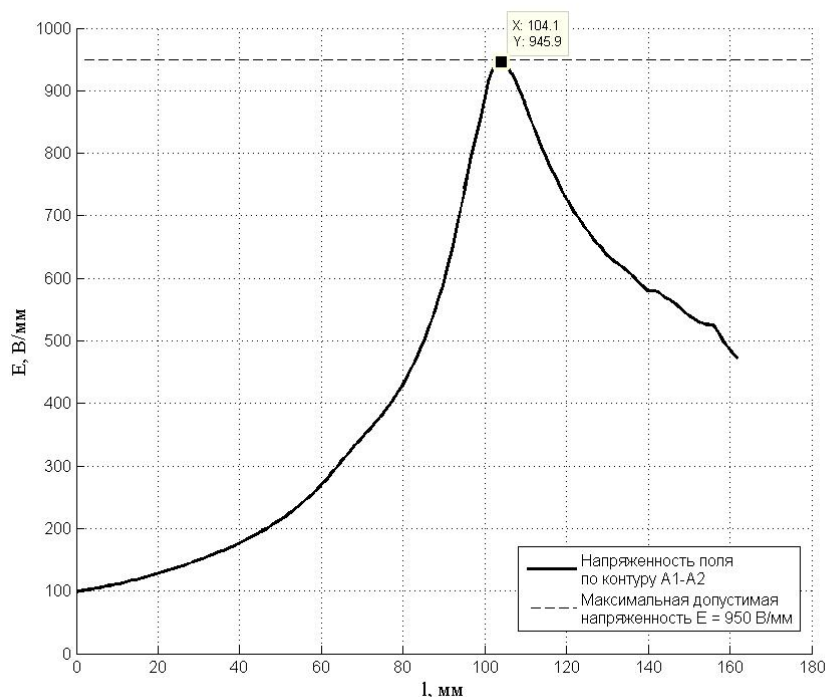


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля

В результате расчета, толщина изоляции, соответствующая заданной напряженности, равна 5.75 мм.

Автоматизация расчетов позволила значительно ускорить процесс вычислений. И, поскольку, перерисовка модели, связанная с изменением толщины изоляции, выполнялась программно, то были исключены ошибки, которые могут возникнуть при «ручном» моделировании.

Стоит отметить, что такой подход применим к широкому классу задач, даже со сложными критериями расчета, к примеру, нахождение оптимума, при одновременном изменении физических и геометрических параметров. Используя комплексы Elcut и MATLAB, можно получить любые характеристики электромагнитного поля, начиная от емкостей и индуктивностей, заканчивая запасенной энергией и механическими воздействиями на проводники.

Научный руководитель: С. С. Шевченко, ст. преподаватель кафедры ТЭВН НГТУ.

## **СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ 160 КВА, НАПРЯЖЕНИЕМ ОБМОТКИ ВН 10 КВ, НН – 0,4 КВ**

А.А. Фролов

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭКМ, группа 5АМ2С

В статье излагаются результаты расчетов стоимости активных материалов в силовом трансформаторе ТМ–160/10, как одного из наиболее распространенных. Его применяют в различных сферах, начиная от электропитания относительно небольших строений, например, магазинов или коттеджей, заканчивая крупными промышленными объектами.

В попытках уменьшить затраты при проектировании силового трансформатора наибольшее внимание уделяют его активной части, состоящей из магнитной системы (магнитопровод) и системы обмоток (обмотки ВН и НН).

Магнитопровод выполнен из холоднокатаной текстурованной рулонной электротехнической стали марки 3405 толщиной 0,3 мм. Данная марка стали обладает одним из наиболее оптимальных соотношений цены и магнитных свойств. Цена электротехнической стали была предоставлена предприятием ГК ГРАФ [3].

Обмотки ВН и НН могут быть выполнены из меди или алюминия. Изготовитель обмоточных проводов – предприятие ООО "ЭЛМА" [4].

Применение правильно подобранного сочетания активных материалов и главных размеров трансформатора обеспечит минимальные затраты на его производство.

Рассмотрим конструкцию с обмотками из меди.

Проведено исследование влияния диаметра стержня магнитопровода на стоимость активных материалов. В таблице 1 представлены результаты расчетов.

Таблица 1. Результаты расчетов стоимости активных материалов трансформатора с обмотками из меди

Диаметр стержня магнитопровода, мм	160	150
Стоимость обмоточного провода обмотки НН, руб	13742	16539
Стоимость обмоточного провода обмотки ВН, руб	23889	29066
Стоимость электротехнической стали, руб	24162	23119
Общая стоимость активных материалов, руб	61793	68725

Переходя на меньший диаметр стержня магнитопровода, увеличивается расход обмоточного провода, но уменьшается расход электротехнической стали.

Рассмотрим конструкцию с обмотками из алюминия.

Кроме влияния диаметра стержня магнитопровода на стоимость активных материалов, исследовано изменение конструкции обмотки НН, заменой обмоточного провода на фольгу. Цена фольги была предоставлена предприятием ГК Роспецсталь [5]. В таблице 2 представлены результаты расчетов.

Таблица 2. Результаты расчетов стоимости активных материалов трансформатора с обмотками из алюминия

Диаметр стержня магнитопровода, мм	150	140	150
Стоимость обмоточного провода обмотки НН, руб	3006	3612	–
Стоимость фольги обмотки НН, руб	–	–	4505
Стоимость обмоточного провода обмотки ВН, руб	6133	6592	5590
Стоимость электротехнической стали, руб	24933	23842	25257
Общая стоимость активных материалов, руб	34072	34046	35352

Использование алюминиевой фольги вместо обмоточного провода в обмотки НН приводит к дополнительным расходам.

Таким образом, экономически целесообразно выполнять силовой трансформатор с обмотками ВН и НН из алюминиевого обмоточного провода.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 6 изд., стереотипное. – Издательский дом Альянс, 2009. – 528 с.: ил.
2. ГОСТ Р 52719–2007 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия»
3. [www.gk-graf.uaprom.net](http://www.gk-graf.uaprom.net)
4. [www.elma-pskov.ru](http://www.elma-pskov.ru)
5. [www.rosspecstall.ru](http://www.rosspecstall.ru)

Научный руководитель: В.М. Игнатович, к.т.н., доцент кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ.

## ВЫЯВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ 6-35 КВ НА ОСНОВЕ ОПЫТА МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

А.С. Карпов, В.В. Ярошевич  
ЦФТПЭС КНЦ РАН

С 2007 года лабораторией ЦФТПЭС КНЦ РАН выполнена серия работ по регистрации качества электроэнергии и выявлению источников искажений. Проведены регистрации в схемах электроснабжения промышленных предприятий и населения г.Северодвинск (Архангельской области), г. Ковдор и Ревдинского района (Мурманской области), а также в распределительной сети Кольского научного центра РАН (табл.1). Общая длительность регистраций составила более 2500 часов.

Таблица 1. Данные об опыте мониторинговых регистраций показателей качества электроэнергии (ПКЭ)

Место измерений	Задачи измерений	Число часов регистраций
ПС-40А г.Ковдор 150/110/35/6 кВ	- контроль ПКЭ на шинах подстанции; - определение источника искажений; - выдача предложений по снижению искажений.	650 ч
ПС-38 г.Северодвинск 110/10 кВ	- исследование влияния нагрузок; - выявление причины повышенного износа силовых трансформаторов; - выдача предложения по ограничению опасных электромагнитных воздействий.	180 ч.
ПС-33 г.Ревда 110/35/6 кВ ПС-361 с.Ловозеро 35/10 кВ	- контроль ПКЭ; - обследование нагрузки потребителей, подключенных к подстанциям ПС-33 и ПС-361; - определения вариантов ее перераспределения.	600 ч 600 ч
Распределительная сеть 10 кВ КНЦ РАН	- энергоаудит организации	480 ч

Для контроля показателей качества электроэнергии использовались сертифицированные средства измерения, регистраторы напряжения и тока «Парма РК6.05» и «Парма РК3.01», которые показали, что проблема наиболее актуальна для сети 6-35 кВ, поскольку с высокой стороны трансформаторов и автотрансформаторов, т.е. со стороны генерирующих компаний несоответствие нормативам ГОСТ 13109-97 не существенно. Результаты регистраций для сети 6-35 кВ в обобщенном виде приведены в таблице 2.

Таблица 2. Обобщение опыта регистраций ПКЭ

№ п/п	Вид зарегистрированного искажения	ПС-40А г.Ковдор	ПС-38 г.Северодвинск	ПС-33 г.Ревда	ПС-361 с.Ловозеро	ТП КНЦ РАН г.Апатиты
1	Отклонение напряжения $\delta U_y$ (установившееся отклонение)	н/с	н/с	н/с	н/с	н/с
	$U_{1(1)}$ (по прямой последовательности)	н/с	н/с	н/с	н/с	н/с
2	Несинусоидальность напряжения $K_U$ (к-т несинусоидальности)	н/с	Норма	н/с	н/с	Норма
	$K_{U(n)}$ (к-т гармоник)	н/с	н/с	н/с	н/с	н/с
3	Несимметрия напряжения $K_{2U}$ , (по обратной последовательности)	Норма	Норма	Норма	Норма	Норма
	$K_{0U}$ (по нулевой последовательности)	н/с	норма	н/с	н/с	н/с
4	Отклонение частоты $\Delta f$	норма	норма	норма	норма	норма

н/с – не соответствует норме (превышение предельно допустимого уровня)

Согласно результатам, приведенным в таблице 2, практически во всех сетях присутствуют показатели электроэнергии не соответствующие нормативу. По результатам проведенных исследований отмечено, что наиболее проблемными показателями КЭ являются установившееся напряжение в сети и синусоидальности напряжения. В Ревде, Ковдоре, Ловозере и в сети КНЦ РАН нарушения ПКЭ регулярно превышают нормально допустимый уровень более чем 5% времени измерения.



Кроме этого, выполненные регистрации в ОАО «Архэнерго» выявили, что при относительно небольших отклонениях ПКЭ по характеру напряжения возможны опасные токовые воздействия, повышающие износ силового оборудования. Особое влияние оказывают ударные колебания силы тока, а также изменения частоты и синусоидальности тока [1, 2].

Регистрация ПКЭ предполагает определение наличия или отсутствия искажения напряжения на системе шин. Однако, разные потребители электроэнергии, подключенные к одной системе шин, могут по-разному влиять на качество электроэнергии в целом. С одной стороны, потребитель может вносить существенные искажения напряжения, тем самым ухудшая качество электроэнергии. С другой стороны, потребитель благодаря характеру подключаемой нагрузки, может компенсировать искажения вносимые другими потребителями. С учетом того, что оба потребителя могут быть подключены к одной системе шин параллельно, регистрация напряжения не позволяет определить от какого именно подключения исходят искажения. Поэтому требуются регистрации токов на каждом подключении в отдельности. Эти измерения также были проведены в схемах электроснабжения промышленных предприятий и населения городов Архангельской и Мурманской областей.

#### *Выводы*

Проведенные исследования ПКЭ и анализ их результатов позволили выявить следующее:

1. Проблема качества является актуальной для распределительной сети 6 - 35 кВ, а также 0,4 кВ, в связи с длительным отсутствием контроля за качеством электроэнергии и ограниченностью средств защиты от искажающих факторов.
2. Контроль ПКЭ с регистрацией лишь напряжения не дает подробной информации об источниках искажения качества электроэнергии [3].
3. Значительные трудности возникают при выявлении источников искажений напряжения [4]. Невозможно синхронизированной регистрации напряжения на секции и всех токов на каждом подключении к исследуемой системе шин. Поэтому при определении источника искажений требуется большой объем сопоставительных измерений.

Выполненные исследования ПКЭ выявили систематичность проблем высоковольтных сетей в целом. Основной из которых является превышение нормативов по установившемуся отклонению напряжения [5]. Согласно [6], это свидетельствует о том, что в иссле-

дуемых сетях давно не проводилась реконструкция присоединений по характеру нагрузки, а также обновление силовых трансформаторов, которые не рассчитаны на резко возросшие за последние 15 лет нагрузки. Поэтому для нормализации ПКЭ это направление развития является основным. Однако не следует забывать о регулировании несимметрии и несинусоидальности напряжения, что позволяет выполнить введенный в 2013 году ГОСТ Р 54149-2010 [7], путем индивидуальных договоров с потребителями, оговаривающих ответственность за внесение (потребление) искажений сети.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Карпов А.С., Ярошевич В.В., Невретдинов Ю.М., Кабеев И.Е., Веселов А.Е., Неклюдов Ю.В., Токарева Е.А., Сеньюшина Л.В. Анализ влияния несимметричных режимов нагрузки на условия работы гидрогенераторов каскада Нивских ГЭС. // Вестник МГТУ.- Мурманск, том 10, №4, 2007. С. 523-526.
2. Карпов А.С., Веселов А.Е., Невретдинов Ю.М., Кабеев И.Е. Разработка рекомендаций по уменьшению влияния нагрузки ОАО «Кандалакшский алюминиевый завод» на генераторы ГЭС-3 Нивского каскада // Электрофизические проблемы надежности эксплуатации высоковольтных сетей. – Апатиты, 2006.- С. 78-84.
3. Ярошевич В.В., Карпов А.С., Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П. Проблемы локализации источников искажений электроэнергии и определение вклада подключенных потребителей в искажение или нормализацию качества электроэнергии // Сборник докладов Десятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС-2008 (24-26 сентября 2008 г., Санкт-Петербург, Россия), - Санкт-Петербург: ВИТУ, 2008.– С.138-142.
4. Невретдинов Ю.М., Ярошевич В.В., Фастий Г.П. Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанциях / Вестник МГТУ.- Мурманск, том 12, №1, 2009.- С.58-64.
5. ГОСТ 13109-97. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

6. РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах энергоснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии.
7. ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Научный руководитель: А.С. Карпов, к.т.н., научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук (ЦФТПЭС КНЦ РАН).

## **4. ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

### **ВАРИАНТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ**

Е.А. Субботина, К.В. Филатов

Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт

Неотъемлемой частью тепловых электростанций являются тепловые водяные сети.

В настоящее время широко проводятся работы по снижению затрат на теплоснабжение и реализации программ энергосбережения, что в климатических условиях России является важной социальной и экономической задачей.

В рамках ее решения следует рассматривать проведение энергетических обследований систем теплоснабжения и тепловых сетей с разработкой мероприятий по энергосбережению, а также разработку схем теплоснабжения населенных пунктов, позволяющих комплексно решать проблемы теплоснабжения территорий.

При проведении энергетических обследований и разработке схем теплоснабжения определяющим является текущее состояние теплоснабжающих систем, позволяющее определять и потенциал энергосбережения, и выбор основных направлений развития систем. Под состоянием систем теплоснабжения далее будем понимать величину расчетной нагрузки, присоединенной к источникам тепла и тепловым сетям.

В методических положениях по разработке схем теплоснабжения рассматривается два возможных варианта определения величины этих нагрузок. Оба подхода имеют ряд недочетов, поэтому целесообразно предложить более адекватную методику оценки фактической величины расчетной нагрузки отопления, вентиляции и средней нагрузки горячего водоснабжения. Основы такой методики были разработаны в ОАО «ВТИ».

Нагрузка горячего водоснабжения (г.в.с.) практически не зависит от температуры наружного воздуха, а нагрузки отопления и вентиляции представляют собой линейную зависимость от наружной температуры. Это позволяет аппроксимировать фактические данные по отпуску тепла линейной зависимостью нагрузки от температуры наружного воздуха.

Методика использует показания приборов учета отпуска (или потребления) тепла от источника, в качестве которого могут рассматриваться целиком ТЭЦ или центральная котельная, отдельные их выходы, а также отдельные тепловые пункты присоединения потребителей. Фактическая расчетная нагрузка будет определена для потребителей после соответствующего узла учета.

Для тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения основное уравнение метода наименьших квадратов при  $m$  температурах наружного воздуха, соответствующих фактическим режимам отпуска тепла имеет вид:

$$\Phi_c = \sum_1^m [(Q_{Ti} - Q_{ТП_i}) - (Q_{O_i} + Q_{ГС})]^2 = \text{мин} \quad (1)$$

где:  $Q_{Ti}$  – фактический часовой отпуск тепла при  $i$ -ой температуре наружного воздуха, Гкал/ч;

$Q_{ТП_i}$  – тепловые потери в тепловых сетях для  $i$ -ого режима, Гкал/ч;

$Q_{O_i}$  – требуемая тепловая нагрузка отопления при  $i$ -ой температуре наружного воздуха, Гкал/ч;

$Q_{ГС}$  – ожидаемая средняя нагрузка горячего водоснабжения, Гкал/ч.

Будем считать, что разность  $Q_{Ti} - Q_{ТП_i}$  соответствует фактическому отпуску тепла потребителям при  $i$ -ой наружной температуре и равна  $Q_{\Phi_i}$ .

Для требуемой нагрузки отопления справедлива формула ее определения через расчетное значение этой нагрузки:

$$Q_{O_i} = Q_O^p \cdot (t_{B_i} - t_{H_i}) / (t_B^p - t_H^p) \quad (2)$$

где:  $Q_O^p$  – ожидаемая величина расчетной тепловой нагрузок отопления и вентиляции тепловых сетей, МВт (Гкал/ч);

$t_H^p$  – температура наружного воздуха, расчетная для отопления, °С;

$t_B^p$  – расчетная температура воздуха в отапливаемых помещениях, °С;

$t_{H_i}$  – текущая температура наружного воздуха для  $i$ -ого режима, °С;

$t_{B_i}$  – текущая температура воздуха в помещениях для  $i$ -ого режима, °С.

После преобразований получим следующие выражения:

$$Q_o^p = \frac{m \cdot Aq - A \cdot \sum(Q_{\phi_i})}{m \cdot A2 - A \cdot A} \quad (3)$$

$$Q_{ГС} = [\sum(Q_{\phi_i}) - Q_o^p \cdot A] / m \quad (4)$$

В уравнениях (7) и (8) для каждой точки измерений параметров режима используется величина температуры воздуха в помещениях, соответствующих этим точкам. В общем случае эти температуры являются неизвестными величинами, определяющими полученные значения расчетных нагрузок.

На начальном этапе по фактическим данным об отпуске тепла по формулам (3) и (4) определяются предварительные начальные значения расчетных нагрузок отопления/вентиляции  $Q_{OH}^p$  и средней нагрузки горячего водоснабжения  $Q_{ГСН}$  при условии, что для всех рассматриваемых точек по температурам наружного воздуха температура воздуха в помещении равна расчетной величине, т.е. выполняются условия  $t_{B_i} = t_B^p$ .

Полученные значения  $Q_{OH}^p$  и  $Q_{ГСН}$  используются в формулах для уточнения значений  $t_{B_i}$ . Последние в свою очередь подставляются в формулы (3) и (4) и т.д. Как показывает практика для получения устойчивых результатов достаточно 3-4 итераций. Отпуск тепла от источника определяется результатами измерений по приборам учета.

Тепловые потери через изоляцию трубопроводов определяются нормативной величиной этих потерь при среднегодовых условиях по температурам сетевой воды, наружного воздуха и грунта или величиной этих потерь при каких либо заданных температурных условиях для тепловых сетей.

По результатам расчетов определяются суммарные нагрузки отопления и вентиляции при расчетной температуре наружного воздуха и воздуха в помещениях (расчетные нагрузки), а также средняя за рассматриваемый период нагрузка горячего водоснабжения. При отпуске тепла на горячее водоснабжение по трехтрубной схеме с использованием линии рециркуляции полученное значение нагрузки г.в.с. представляет собой сумму собственно нагрузки и потерь тепла в линии рециркуляции, в стояках зданий и полотенцесушителях. Дополнительные потери тепла, связанные с обеспечением нагрузки г.в.с., могут быть учтены соответствующим коэффициентом.

Данная методика позволяет определять фактические расчетные нагрузки с точностью не менее 5-7% от суммарной их величины. Это обусловлено некоторой вариативностью распределения отпуска тепла

между предварительно неизвестными нагрузками отопления и горячего водоснабжения. Повышение точности определения расчетных нагрузок может быть получено при условии заданности нагрузки горячего водоснабжения. Эта нагрузка может быть получена из анализа отпуска тепла в летний период, когда нагрузки отопления и вентиляции отсутствуют.

Достоверная информация о фактической расчетной нагрузке присоединенных к источникам тепла потребителей позволяет более обоснованно планировать развитие систем теплоснабжения при разработке схем теплоснабжения населенных пунктов и разрабатывать адекватные мероприятия по повышению эффективности теплоснабжения при проведении энергетических обследований тепловых сетей.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергоиздат, 1982.-360 с.
2. Приказ с Минрегион совместный с Минэнерго России №565/667 «О методических рекомендациях по разработке схем теплоснабжения» от 29.12.2012г.
3. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. РД 34.09.155-93.

Научный руководитель: С.А. Байбаков, заведующий лабораторией теплофикации ОАО «ВТИ».

### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОФИКАЦИИ, ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ**

П.В. Стружков

Вологодский государственный технический университет

Суровые климатические условия в России предопределяют теплоснабжение как наиболее социально значимый и в то же время наиболее ёмкий сектор экономики: в нем потребляется почти 40% энергоресурсов, используемых в стране, а более половины этих ресурсов приходится на коммунально-бытовой сектор. Несмотря на это теплоснабжение в отличие от основных отраслей ТЭК (топливно-энергетический комплекс) не имеет единой технической, структурно-инвестиционной, организационной и экономической политики. Относительно прозрачны лишь системы централизованного теплоснабжения.

В настоящее время около 72% всей тепловой энергии производится централизованными источниками, остальные 28% производятся децентрализованными источниками, в том числе 18% - автономными и индивидуальными источниками. Кроме того, незначительная часть спроса на тепловую энергию (4,5 %) удовлетворяется за счет утилизации сбросного тепла от технологических установок, а доля тепла, получаемого от возобновляемых источников энергии, пренебрежительно мала. В России электроэнергетика теснейшим образом связана с теплоснабжением: на тепловых электростанциях производится более 60 % электрической и почти 32% тепловой энергии, используемой в стране. При этом практически третья часть электроэнергии, производимой всеми ТЭС, вырабатывается в комбинированном цикле.

Комбинированный цикл - это усовершенствованная разновидность последовательного цикла. Здесь работа пресса и средств автоматизации также происходит последовательно, однако часть, движений средств автоматизации совмещена во времени с движением ползуна пресса. При этом исключаются потери времени на срабатывание систем управления. Комбинированный цикл заключают в себе многие преимущества совмещенного цикла, а производительность при этом выше, чем при последовательном. При совмещенном цикле его продолжительность определяется по формуле, где паспортное число ходов ползуна пресса в минуту.

Эффективность работы ТЭЦ (разновидность тепловой электростанции, которая производит не только электроэнергию, но и является источником тепловой энергии в централизованных системах теплоснабжения) общего пользования и ряда федеральных ГРЭС (государственная районная электростанция, тепловая конденсационная электростанция, производящая только электрическую энергию) с большими объемами отпуска тепла во многом зависит от эффективности функционирования систем централизованного теплоснабжения, в составе которых работают эти станции. Кроме указанных ТЭЦ и ГРЭС, а также АТЭЦ (атомные ТЭЦ), в городах работает много так называемых промышленных ТЭЦ и котельных, которые входят в состав промышленных предприятий и снабжают их, а также прилегающие жилые районы тепловой (прежде всего) и электрической энергией. Системы централизованного теплоснабжения являются локальными монополиями. В общем системами централизованного теплоснабжения в России вырабатывается около 1,4 млрд Гкал в год. Около 600 млн Гкал тепловой энергии ежегодно производят 68 тыс. коммунальных котельных. В большинстве крупных городов централизованным теплоснабжением обеспечено 70-95% жилого фонда.



Около 50% объектов коммунального теплоснабжения и инженерных сетей требуют замены, не менее 15% находятся в аварийном состоянии. На каждые 100 км тепловых сетей ежегодно регистрируется в среднем 70 повреждений. Потери в тепловых сетях достигают 30%. Помимо потерь тепла, с утечками теплоносителя ежегодно теряется более кубокилометра воды. 82% общей протяженности тепловых сетей требуют капитального ремонта или полной замены.

К основным причинам такого состояния систем коммунального теплоснабжения относятся: дефицит финансов, износ оборудования и тепловых сетей, слабое управление и нерешенные вопросы разграничения полномочий и ответственности в коммунальной энергетике, отсутствие перспективных схем развития систем теплоснабжения и т.п.

Для решения накопившихся проблем в теплоснабжении, которые проявились в последние годы особенно в жилищно-коммунальном секторе и связаны с эксплуатацией и дальнейшим развитием систем теплоснабжения, необходимо осуществление комплекса мер:

- объединение тепловых сетей АО-энерго и муниципальных тепловых сетей в рамках одного энергетического предприятия, что однозначно определит ответственность таких предприятий за надежное и экономически эффективное теплоснабжение конечных потребителей со всеми вытекающими из этого правовыми, экономическими и технологическими последствиями;
- обновить, расширить и при необходимости создать заново, комплексную нормативную базу, регулиующую решение проблем теплоснабжения силами и средствами всех производителей тепловой энергии;
- создать информационно-аналитические базы данных и организовать мониторинг всех действующих систем теплоснабжения для определения реальных затрат энергоресурсов, расходуемых на теплоснабжение, с последующей корректировкой направлений развития теплоснабжения в городе, в регионе, в стране;
- введение системы тарифов на тепловую энергию с выделением ставок за мощность и энергию, а также дифференцированных тарифов по объемам потребления, времени года, числу часов использования максимума нагрузок, и главное - отдельно по городам с целью исключения перекрестного субсидирования неэкономичных источников тепла за счет высокорентабельных;

- обеспечить управление спросом на тепловую энергию силами и средствами потребителей, для чего потребуются массовое внедрение систем автоматического регулирования на тепловых пунктах у конечных потребителей с поэтапным переходом на независимые схемы присоединения к сети и внедрением количественного и количественно-качественного регулирования отпуска тепловой энергии, которая может быть поставлена в сеть от различных источников;
- развитие рыночных отношений и изменение структуры собственности, что повлияет на структуру производства тепловой энергии в направлении децентрализации и меньшей зависимости от АО-энерго;
- осуществление реконструкции, модернизации и развития действующих систем централизованного теплоснабжения с целью максимально возможного использования комбинированного производства электрической и тепловой энергии;
- принять меры по повышению надежности тепловых сетей, в частности путем повсеместного перехода на современные предварительно изолированные трубы, и совершенствованию оборудования, используемого в системах централизованного и децентрализованного теплоснабжения.

В рассматриваемой перспективе прогнозируется рост производства тепловой энергии в 2020 г. на 22-34 % больше, чем в 2000 г. При этом предусматривается рост реального потребления тепловой энергии в 1,4-1,5 раза за счет сокращения потерь и использования высокого потенциала энергосбережения в этом секторе энергетики. Любые сбои в обеспечении тепловых потребностей негативным образом воздействуют на экономику страны и усиливают социальную напряженность. Поэтому в рассматриваемой перспективе государство должно оставаться важнейшим агентом экономических отношений в отрасли. Намечаемые уровни развития теплоснабжения и теплофикации, коренная модернизация и техническое перевооружение отрасли потребуют значительного роста инвестиций. Основным источником капитальных вложений будут являться собственные средства предприятий отрасли, государственное финансирование, заемные средства, в том числе инвестиционных и финансовых структур, привлеченные на условиях проектного финансирования.

Сценарии развития теплоэнергетики, связанные с возможностью радикального изменения условий топливо обеспечения тепловых электростанций в европейских районах страны, ужесточение экологических требований, преодоление к 2010 г. тенденции превышения

темпов нарастания объемов оборудования электростанций, выработавших свой парковый ресурс, над темпами вывода его из работы и обновления требуют скорейшего внедрения достижений НТП (научно-технический прогресс) и новых технологий в электроэнергетике. Для электростанций, работающих на газе, такими технологиями являются: парогазовый цикл, газотурбинные надстройки паросиловых блоков и газовые турбины с утилизацией тепла. На электростанциях, работающих на твердом топливе, - экологически чистые технологии сжигания угля в циркулирующем кипящем слое, а позже - газификация угля с использованием генераторного газа в парогазовых установках.

В целях преодоления отставания России в масштабах использования ВИЭ, сохранения запасов истощаемого органического топлива для будущих поколений, существенного улучшения энергоснабжения удаленных от электросетей населенных пунктов, а также улучшения экологической обстановки в экологически напряженных районах необходимо разработать и принять Федеральный закон «О возобновляемых источниках энергии» и соответствующее Постановление Правительства Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дьяков А. Ф. Основные направления развития энергетики России.
2. Хрипев Л. С. Усиление взаимосвязей в развитии теплоснабжения и ТЭК.
3. Концепция энергетической политики России в новых экономических условиях М.: Минтопэнерго.

Научный руководитель: А.Н. Швецов, д.т.н., профессор Вологодский государственный технический университет.

### **ПРИМЕНЕНИЕ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА MPS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ КОРИУМА**

Д.В. Гудеменко

Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический институт

#### **Введение**

Фрагментация расплавленного металла является ключевым процессом при паровом взрыве. Скорость фрагментации определяет ам-

плитуду волн давления. Для количественной оценки повреждений, вызванных паровыми взрывами, требуется четкое понимание процессов фрагментации. В частности, термическая фрагментация капли расплава является важнейшим процессом на стадии инициирования парового взрыва, т.к. влияние давления не достаточно сильно, чтобы вызвать гидродинамическую фрагментацию. Процессы термической фрагментации настолько быстрые, что их природу трудно определить экспериментально. Численное моделирование термической фрагментации также затруднено, поскольку требуется одновременно рассматривать расплав, пар и воду в процессе кипения и фрагментации. Использование классических методов конечных разностей при рассмотрении данной проблемы приводит к значительному искажению процесса из-за численной диффузии. Альтернативным вариантом моделирования такого класса задач являются бессеточные методы.

В настоящее время они получают все большее распространение в сфере численного моделирования задач гидродинамики со свободными границами. Среди них выделяют подкласс методов частиц. Эти методы не требуют использование сетки ни на стадии построения функций форм, ни на стадии интегрирования уравнения движения. Их основная идея состоит в дискретизации области расчета набором лагранжевых частиц, которые могут свободно передвигаться в рамках наложенных на них, посредством основных уравнений динамики сплошной среды, связей. Функции формы при таком подходе строятся на каждом шаге по времени с использованием различного набора узлов (частиц). Бессеточная природа методов, а также простота реализации и использования обусловили их огромную популярность в сфере решения задач со свободными границами. В данной работе проведен анализ термической фрагментации бессеточным методом MPS[1].

#### **Постановка задачи**

Задача рассматривается в двумерном приближении. Анализируются две ситуации: столкновение одной водной струи с расплавом и столкновение двух водных струй с расплавом (рис 1). В качестве материала расплава рассматривается олово при температуре 700 С, плотность  $\rho=6650$  кг/м<sup>3</sup>; вода при 100 С и плотность  $\rho=958.84$  кг/м<sup>3</sup>; масштаб длины характеризуется длиной струи  $l$ . Проводились вычисления при  $l=0.8$  мм и при 1.6 мм. Расстояние между струями принималось  $d=1.25l$ . Скорость струи  $v$  варьировалась в диапазоне от 1 до 30 м/с. Также предполагалось, что плотность струи жидкости также изменяется.

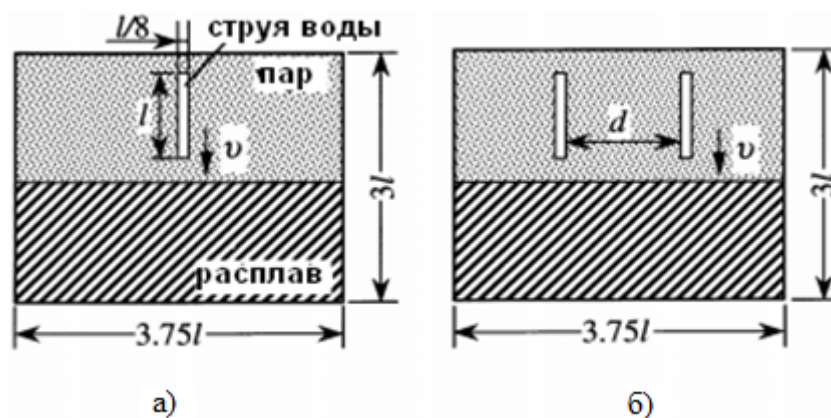


Рис. 1. Столкновение струй воды с расплавом олова: (а) одна струя (б) две струи

### Результаты расчетов

Результаты расчета столкновения одной струи с расплавом при параметрах струи  $l=0.8$  мм и  $v=5$  м/с представлены на рисунке 2 (а). На рисунке видна неглубокая дыра в расплаве (кратер) в результате взаимодействия струи с расплавом. В случае же, если плотность струи жидкости больше, происходит гораздо более глубокое проникновение струи воды в расплав. Результаты представлены на рисунке 2 (б).

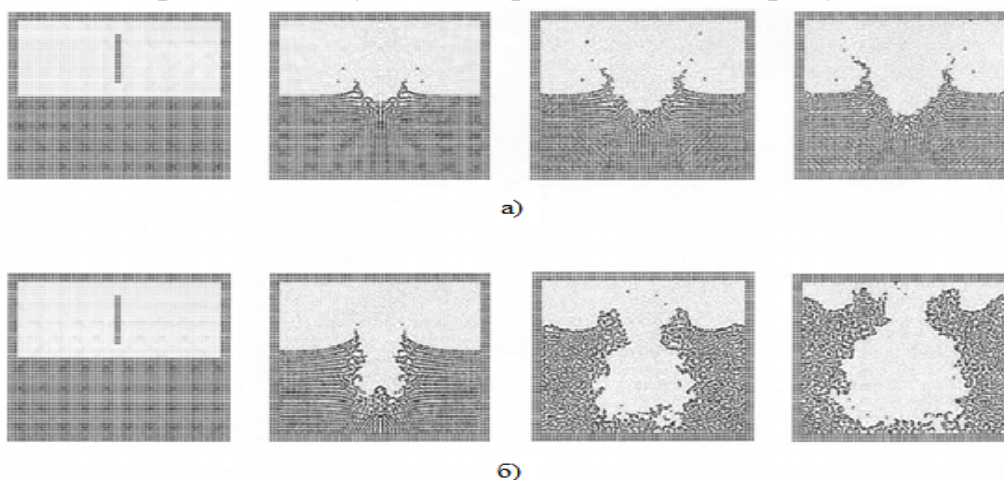


Рис. 2. Результаты вычислений в случае столкновения одной струи с расплавом,  $l=1.6$  мм и  $v=5$  м/с, интервал между картинками 0.6 мс.

а)  $(\rho_{jet}/\rho_{pool})=(\rho_{water}/\rho_{tin})=0.144$ ; б)  $(\rho_{jet}/\rho_{pool})=4.0$

Результаты взаимодействия двух струй воды с расплавом при тех же условиях представлены на рисунке 3 (а). В ходе данного расчета можно заметить, что часть расплава, находящегося меж двух струй поднимается над поверхностью расплава и образует нить. Это согласуется с рентгеновскими снимками, полученными Ciccarelli и Frost [2].

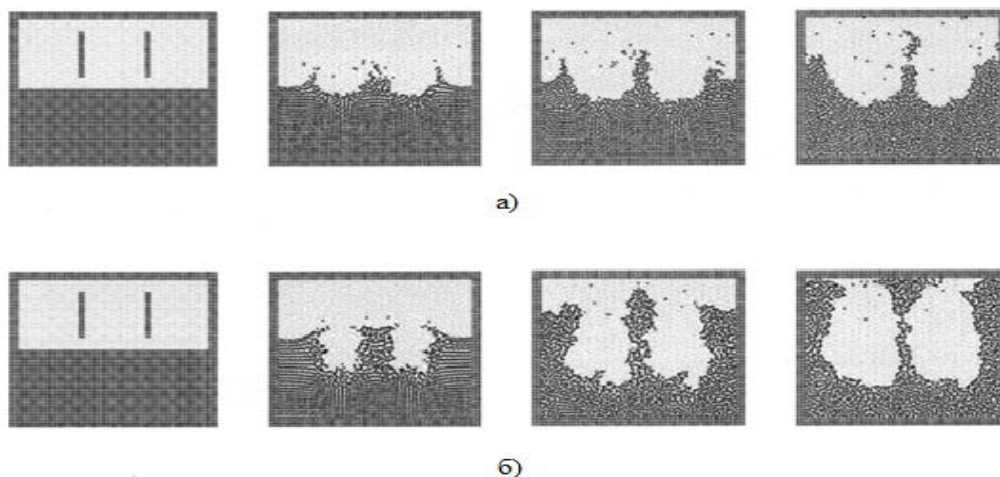


Рис. 3. Результаты вычислений в случае столкновения двух струй с расплавом,  $l=1.6$  мм и  $v=5$  м/с, интервал между картинками 0.6 мс.

а)  $(\rho_{jet}/\rho_{pool})=(\rho_{water}/\rho_{tin})=0.144$ ; б)  $(\rho_{jet}/\rho_{pool})=4.0$

### Заключение

В качестве численного метода выбран полуневязный метод движущихся частиц MPS.

Выполнено численное моделирование процесса столкновения одной водяной струи с расплавом и двух водяных струй с расплавом, используя MPS метод. Полученные результаты сопоставлены с двумя теоретическими моделями фрагментации капли расплава Kim-Corradini [3] и Ciccarelli-Frost.

Установлено, что проникновение струи воды, которое предполагается в модели фрагментации Kim-Corradini, в расчетах не наблюдалось. Такое проникновение возможно только в гипотетической ситуации, когда плотность жидкости струи больше чем плотность расплава.

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

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Koshizuka S., Tamako H., Oka Y. A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation // International Journal of Computational Fluid Dynamics.-1995. N 4. – pp. 29-46
2. Ciccarelli G., Frost D.L. Fragmentation mechanisms based on single drop stem explosion experiments using flash X-ray radiography // Nuclear Engineering and Design.- 1994. 146 (1-3).- pp. 109-132

3. Kim B., Corradini M.L., 1988. Modeling of small-scale single droplet fuel:coolant interactions // Nuclear Science and Engineering.- 1998.
4. Vol. 98.- pp. 16–28.

Научный руководитель: В.И. Мелихов, д.т.н., профессор НИУ МЭИ.

### **ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПАР В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ И ПАРАМЕТРОВ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ПОДАЧИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ВИБРАЦИИ ГЛАВНЫХ ПАРОПРОВОДОВ АЭС С ВВЭР**

М.В. Запорожец, А.А. Дятловский  
Национальный исследовательский университет  
Московский энергетический институт

Эксплуатационные вибрации паропроводов на АЭС с ВВЭР-1000 типа В-320 наблюдались с самого начала эксплуатации. Впервые она возникла на Запорожской АЭС и остается актуальной для всех последующих блоков данной серии АЭС (Хмельницкая, Балаковская, «Темелин», Волгодонская ).

Зафиксированные повышенные вибрации системы паропроводов свежего пара приводили к различным повреждениям (появлению свищей, обрыву вспомогательных трубопроводов обвязки арматуры и т.п.), а также обуславливали многократное снижение циклической прочности [1].

Повышенный уровень вибраций, в указанных системах, является существенным недостатком вводимых в эксплуатацию АЭС, в том числе и поставляемых за рубеж. Ввиду этого, прогнозирование возникновения акустических резонансов и снижение уровней вибраций в главном паропроводе АЭС с ВВЭР-1000 является актуальной задачей.

Указанные динамические эффекты происходят в оборудовании, разрабатываемом различными организациями, поэтому выявление причин их и разработка методов их предотвращения не находит должного отражения в проектно-конструкторской документации.

В подводящих трубопроводах создаются волны давления, которые распространяются со скоростью звука. Это подтверждено прямым измерением пульсаций давления на ТХ80 АЭС «Темелин» [2]. На энергоблоке №4 Балаковской АЭС были измерены доминирующие частоты [3] эксплуатационных вибраций на 4ТХ50,70,60,80, которые

составили величины: 65,5 Гц; 38,5 Гц; 39,5 Гц; - 58,0 Гц; 38,5 Гц соответственно.

### **Идентификация акустических резонансов в 4ТХ50,70,60,80**

В ходе трехмерного моделирования двухфазных течений [4] подробно исследована картина стационарного течения теплоносителя в корпусе парогенератора (ПГ) при номинальной мощности реактора 3000 МВт.

Расчет предсказывает наличие значительного количества воды над дырчатым листом (рис. 1.). Вынос воды происходит, главным образом, за счет захвата капель воды интенсивным восходящим потоком пара. Характерные величины скорости теплоносителя через отверстия дырчатого листа составляют около 7 м/с. Между трубным пучком и дырчатым листом, образуется паровая подушка. Толщина подушки больше с «горячей» стороны пучка, локальный максимум паросодержания (около 90 %) под дырчатым листом наблюдается с «холодной» стороны, подача питательной воды (ПВ), эффективно уменьшающая паросодержание, осуществляется над «горячей» частью трубного пучка.

В работе [4] проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений объемного паросодержания и объемной скорости смеси для стационарного состояния ПГ и при номинальном уровне мощности. Показано, что расчет достаточно хорошо описывает распределение паросодержания и скоростей в объеме ПГ. Во всех точках объема ПГ, где проводились измерения, отмечается монотонное снижение паросодержания при уменьшении мощности.

По результатам расчетного распределения локального объемного паросодержания в вертикальных поперечных сечениях, расположенных на расстоянии  $L$  от днища ПГ. На основе распределения локального объемного паросодержания в вертикальных поперечных сечениях для  $L = 6,8$  м (а) и  $L = 4$  м (б), представленных на рис.1, выполнена приближенная оценка размеров объема парогенератора заполненного двухфазной средой и средней по этому объему величины паросодержания.



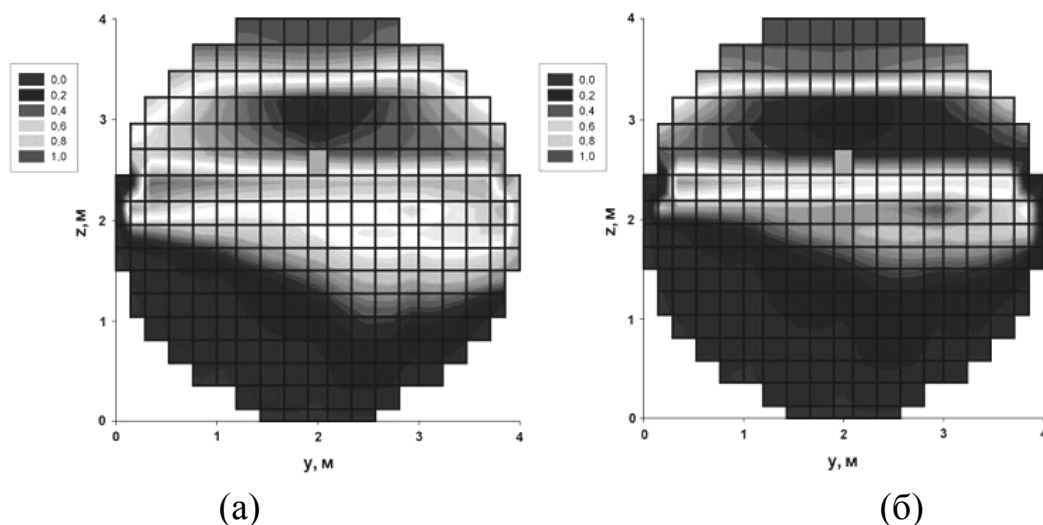


Рис. 1. Расчетные распределения локального объемного паросодержания в вертикальных поперечных сечениях ПГ для  $L = 6,8$  м (а) и  $L = 4$  м (б).

Величина паросодержания и объем парогенератора занятый двухфазной средой определяется в соответствии с цветовой шкалой, приведенной слева от оси  $z$ . Среднее объемное паросодержание ( $\varphi = 0,635$ ) рассчитано по значениям, полученным для каждого сечения (см. рис.1). Этому значению объемного паросодержания соответствует сухость пара  $x = 0,07$ . В работе [5] показано, что при значении сухости пара близком к  $x = 0,07$ , скорость звука в двухфазной среде меняется в широком диапазоне величин и, в зависимости от соотношения скоростей фаз в звуковой волне, отношение скорости звука в двухфазной среде к скорости звука в паре меняется от 0,2 до 0,7. Проведенные расчетные оценки [6] позволяют идентифицировать источники акустических колебаний, измеренных в главном паропроводе 4-го блока Балаковской АЭС, имеющих значения частот 38, 58, 46 и 65,5 Гц. Расчеты показывают [7], что частота акустических колебаний объема ПГ содержащего пар и пароводяную смесь зависит от давления и сухости (влажности) рабочей среды в этом объеме и может регулироваться путем изменения рабочего уровня воды в ПГ.

В исследованном диапазоне изменения средней по паровому объему ПГ влажности пара (0,93 – 0,6) [8], расчетная частота акустических колебаний, генерируемых в объеме ПГ содержащем паровую фазу, соответствует диапазону 16 – 70 Гц [7]. Приведенные результаты показывают, что для предотвращения резонанса частот колебаний объемов, содержащих пар и пароводяную смесь в нескольких параллельно включенных парогенераторах, необходимо поддерживать в них различные уровни воды. Поскольку на уровень воды в парогенераторе влияет расход подаваемой питательной воды (ПВ), ее темпера-

тура и давление, необходимо провести оценку этих параметров на входе в исследуемую систему.

В соответствии с имеющимся монтажно-сборочным чертежами системы подачи питательной воды создана (в пакете DesignModeler) модель трубопроводов части системы подачи питательной воды. Исследуемый элемент системы подачи питательной воды представлен на рис. 2. На Рис. 2. показаны два параллельных трубопровода, по которым после подогревателей высокого давления при температуре 2200С (этот вариант обозначен 220/220), поступает в систему тройников, где 2 потока ПВ разделяются на 4 потока, и далее подаются в 4 ПГ. В настоящее время выполнена подготовка исходной модели для геометрии участка системы подачи ПВ и проведена ее адаптация к реалиям используемого программного решателя.

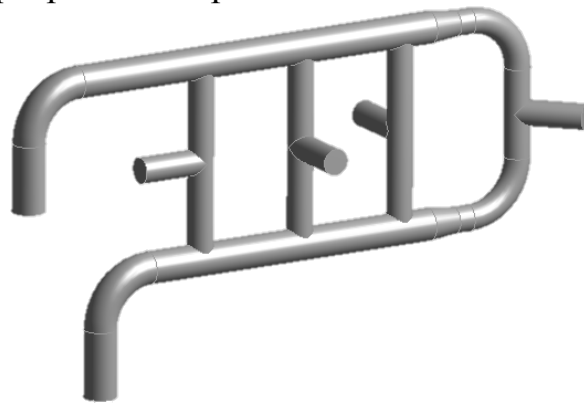


Рис. 2. Исследуемый элемент системы подачи питательной воды.

Геометрические размеры модели соответствуют размерам реально существующей системы. Эпюра скоростей жидкости в продольном сечении рассматриваемого элемента системы подачи ПВ приведена на рис.3.

Авторы выражают благодарность д.т.н., проф. НИУ «МЭИ» Вячеславу Ивановичу Горбурову за идею исследовать поля теплофизических параметров жидкости в системе подачи питательной воды.

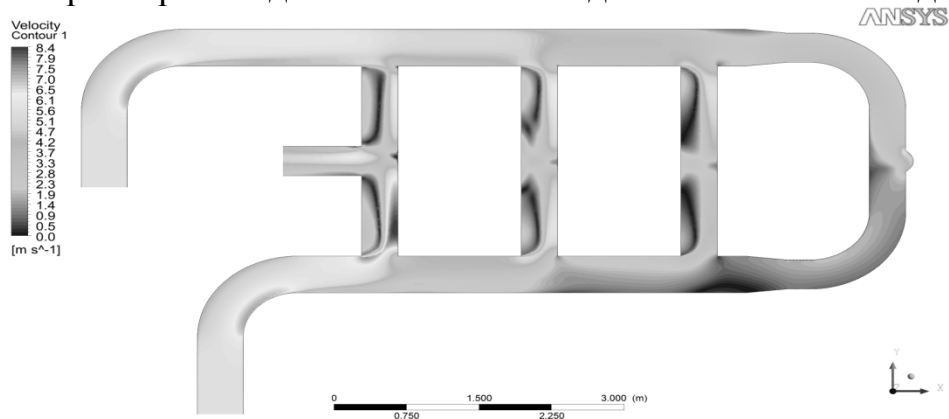


Рис. 3. Эпюра скоростей жидкости в продольном сечении 220/220.

Разработанные методы и алгоритмы расчета предназначены для идентификации, прогнозирования и предотвращения возникновения акустических резонансов и уменьшения уровня вибраций в оборудовании.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Юнек Л., Валента М. Измерение пульсаций давления и эксплуатационных вибраций на 1 блоке: Отчет/ÚAM Брно, октябрь 2006 (на чешском яз.). – 51 с.
2. И.Н. Веселова, М.В. Окулова. Исследование вибраций главных паропроводов свежего пара первого энергоблока Волгодонской АЭС. Известия вузов • Ядерная энергетика • №1 • 2010, стр. 49-55
3. Ю.Ф. Кутдюсов. Методика оценки вибросостояния главных паропроводов системы ТХ50,60,70,80 энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 //Тех. филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» и НИЦЭ «Центрэнерго» 2009.№ 1.2.3.03.999. 44 С.
4. Исследование динамики течений двухфазных смесей в циркуляционных контурах АЭС с помощью трехмерного теплогидродинамического кода БАГИРА. Калиниченко С.Д., Крошилин А.Е., Крошилин В.Е., Смирнов А.В. в сб.Труды 5-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», с. 18
5. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. 2-е изд. М. Энергоиздат, 1981. — 472 с.
6. Беликов С.О. Разработка методов идентификации акустических резонансов и снижения уровней вибраций в главном паропроводе АЭС с ВВЭР-1000. Автореферат кандидатской диссертации. – 2012.
7. К.Н. Проскуряков Влияние уровня воды в парогенераторе на вибрации главных паропроводов АЭС с ВВЭР – 8-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия 28-31 мая 2013 г.»
8. Н. Б. Трунов, С. А. Логвинов, Ю. Г. Драгунов. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. - М: Энергоатомиздат, 2001.

Научный руководитель: К.Н. Проскуряков д.т.н., профессор МЭИ.

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Г.А. Китаев, С.В. Лавриненко  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТЭС группа 5022

На данный момент в мире продолжает развиваться интерес к атомной энергетике. Развитие атомного энергопромышленного комплекса постепенно становится для многих стран приоритетной задачей. Запланировано строительство большого числа новых энергоблоков, действующие энергоблоки нуждаются в квалифицированном персонале и должном контроле.

Процесс создания реакторных и ядерных энергетических установок является невероятно длительным и наукоемким. При этом важным фактором является необходимость их соответствия высоким международным требованиям по безопасности. Постепенное совершенствование создаваемых установок, с опорой на опыт и тщательную экспериментальную отработку новых решений, имеет большие ограничения вследствие значительной продолжительности и высокой стоимости процесса проектирования.

Применение компьютерных и суперкомпьютерных технологий моделирования в атомной отрасли позволит достичь более высокого уровня технических характеристик и без опасности проектируемых объектов сократить сроки разработки и снизить затраты на создание новых конкурентных образцов оборудования за счет оптимизации отдельных элементов конструкций и обоснования различных режимов работы, основанных на детальном анализе протекающих в них физических процессов. Таким образом, внедрение таких технологий в работу предприятий атомной отрасли, направленное на достижение нового качества и конкурентоспособности продукции при снижении сроков и стоимости ее создания, сегодня является важнейшей задачей.

Кроме того, необходимость в организации подготовки специалистов на тренажерах энергоблоков, ещё не введённых в эксплуатацию, заставляет пересмотреть классические подходы в строении тренажеров и разработать новые инструменты моделирования.

### **Суперкомпьютерное моделирование**

Суперкомпьютер (англ. supercomputer) — вычислительная машина, значительно превосходящая по своим техническим параметрам большинство существующих компьютеров. Как правило, современные суперкомпьютеры представляют собой большое число высоко-

производительных серверных компьютеров, соединённых друг с другом локальной высокоскоростной магистралью для достижения максимальной производительности.

Применение суперкомпьютерных технологий позволит решить многие сложные задачи в интересах атомной энергетики. В их числе: оптимизация элементов конструкций, обоснование ресурсных и иных характеристик оборудования, обоснование режимов эксплуатации, выбор оптимальных режимов работы.

В частности, на сегодняшний день уже получены важные результаты. Созданы первые варианты пакетов программ для имитационного 3D-моделирования на суперкомпьютерах с массовым параллелизмом, которые обеспечивают эффективное проведение расчетов при моделировании отдельных элементов конструкций изделий. Их адаптация для решения конкретных задач для практического применения на предприятиях ведется в тесном сотрудничестве ряда ведущих отраслевых организаций, таких как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ОАО «ОКБМ Африкантов», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ОАО «СПбАЭП» и других.

К примерам практического применения суперкомпьютерного моделирования можно отнести следующие задачи, выполненные с использованием пакетов программ, разработанных во ФГУП Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики («РФЯЦ-ВНИИЭФ») [1]:

- расчет работы устройства ограничителя течи в случае гипотетической аварии при работе реакторной установки средней мощности ВБЭР-300;
- исследование состояние контейнента АЭС при падении на него самолета;
- определение гидравлических характеристик ячейки твэльно-го пучка и т.д.

### **Проектирование в формате 6D**

Уже много лет мировая тенденция в проектировании — использование компьютерных программ и технологии 3D, которая позволяет практически полностью исключить ошибки в работе, улучшить качество и сократить сроки проектирования. При строительстве российских атомных станций уже используется и формат 4D, где все операции описаны как в пространстве, так и во времени. Но 6D-проектирование — это еще более перспективная технология. Она подразумевает, что, помимо 3D-проектирования, в проекте будет реализовано управление поставками оборудования, персоналом и срока-

ми строительства типового энергоблока. То есть к трем физическим измерениям добавятся еще три: время — в виде календарно-сетевого планирования сооружения блока; оборудование — как информация о конфигурации, комплектации и поставке необходимых материалов и агрегатов; ресурсы — трудовые, технические финансовые и иные.

6D-проектирование состоит из нескольких этапов. Первый шаг — это построение 3D-модели объекта, в которой содержится почти вся номенклатура 6D-проекта. Уже из 3D-модели можно получить почти все необходимые показатели для создания 6D-модели, такие как физические объемы оборудования, трубопроводов, количество сварочных швов.

Следующим шагом является автоматизированное построение графика, определяющего очередность монтажа модели и сроки монтажно-строительных работ. Из модуля согласования проекта выводится спецификация оборудования, трубопроводов, сварочных стыков на каждом участке проектируемой системы.

Также 6D-модель включает в себя данные по количеству человеческих ресурсов с указанием их специализации и подрядчиков, что позволяет оптимизировать строительство по количеству трудовых ресурсов. То есть улучшается процесс монтажа оборудования[2].

#### **Обучение специалистов**

Вместе с ростом производительности доступной персональной вычислительной техники стимулируется разработка систем интегрирования сложных моделирующих комплексов с современным аппаратом визуализации для создания аналитических симуляторов и расчетных комплексов широкого применения (обучение, ВУЗы, инженерные задачи и др.).

Использование компьютерного моделирования для обучения молодых специалистов является одним из самых перспективных путей его развития, так как это существенно повышает качественный уровень специалистов, уменьшает сроки их адаптации после трудоустройства. Особенно это актуально в отраслях в которых чрезмерно затратно и практически невозможно изготовить натурные тренажеры, а теоретическая информация не даёт полного представления о действующих системах. Одной из таких отраслей является атомная энергетика, поэтому применение компьютерного моделирования в ней крайне необходимо.

Так в «Национальном Исследовательском Томском Политехническом Университете» для обучения студентов по специальностям, связанным с атомными и тепловыми электростанциями, уже применяются различные пакеты программ, моделирующие процессы на

АЭС и ТЭС. Примером этих программ может послужить SSL DYNCO LAB SYSTEM - прикладное программное обеспечение для проведения лабораторных работ по курсу “Физика ядерных реакторов”, разработанное в ООО Экспериментальный научно – исследовательский и методический центр "МОДЕЛИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ". Данный программный комплекс включает:

- модель нейтронной кинетики;
- теплогидравлическую модель активной зоны;
- модели трех активных зон реакторов: РБМК-1000, ВВЭР-1000 и БН-800.

Каждая из моделей позволяет выполнять статические и динамические расчеты[3].

### **Заключение**

Компьютерное моделирование уже доказало свою эффективность в ряде вопросов, поэтому ожидаемыми результатами применения суперкомпьютерных технологий в атомной энергетике являются:

- минимизация дорогостоящих натуральных экспериментов для подтверждения ресурсов оборудования реакторных установок, составляющих до 20% стоимости Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);
- сокращение объема НИОКР в инновационных проектах на 40-50%;
- снижение сроков разработки и проектирования реакторных установок на 20-50%.

Анализ сравнения расчетов и экспериментальных данных, полученных при выполнении пусконаладочных работ на действующих АЭС, также показывает адекватность моделирования и стимулирует его дальнейшее распространение в области атомной энергетике.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Власов С., Костюков В. Суперкомпьютерные технологии – важнейшее инновационное направление развития атомной отрасли//“Безопасность Окружающей Среды”: Научно-технологическое обеспечение атомной отрасли.-2010.-N 3.–С. 18-24
2. Атомные стройки. Проектирование АЭС в формате 6D// <http://publicatom.ru/blog/stroyka/1728.html>
3. SSL DYNCO LAB SYSTEM - Прикладное программное обеспечение для проведения лабораторных работ по курсу “Фи-

зика ядерных реакторов” (описание), г. Обнинск, 2012 г-  
С.3,11

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ассистент кафедры  
АТЭС ЭНИН ТПУ.

## **УЛУЧШЕНИЕ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА**

Э.Р. Зверева, Р.В. Хабибуллина

Казанский государственный энергетический университет

Особенностью современной нефтеперерабатывающей промышленности является тенденция к углублению переработки нефти, что объясняется ограниченностью ее запасов, а также ужесточением экологических требований к нефтепродуктам. По мере углубления переработки нефти доля прямогонного мазута в котельных топливах снижается, а доля гудрона и тяжелых крекинг - остатков растет, т.е. качество топочного мазута ухудшается [3]. Снижение качества мазута для потребителя означает ухудшение его физической стабильности и уменьшение эффективности горения.

Повышение эффективности использования мазутов связано с управлением режимами горения, с эмульгированием топлива, с введением в топливо присадок.

Отечественный и зарубежный опыт применения многофункциональных присадок к топочному мазуту показывает их безусловную целесообразность, а в случае сжигания низкокачественных высокосернистых мазутов – и необходимость.

Для разрушения стабильных эмульсий, встречающихся при нефтедобыче и обычно состоящих из различных количеств воды или соляного раствора, а также эмульсий, образующихся при нефтепереработке, используются деэмульгаторы, представляющие собой ПАВ различной химической природы [3].

Дипроксамин-производный от амина реагент, получаемый путем последовательного оксиэтилирования и оксипропилирования этилендиамина

Применяется в качестве активной основы деэмульгаторов и ингибиторов парафиноотложений для нефтяной промышленности.

Расчетные уравнения и результаты экспериментальных исследований с учетом погрешности эксперимента в графическом виде представлены на рисунках 1-2.



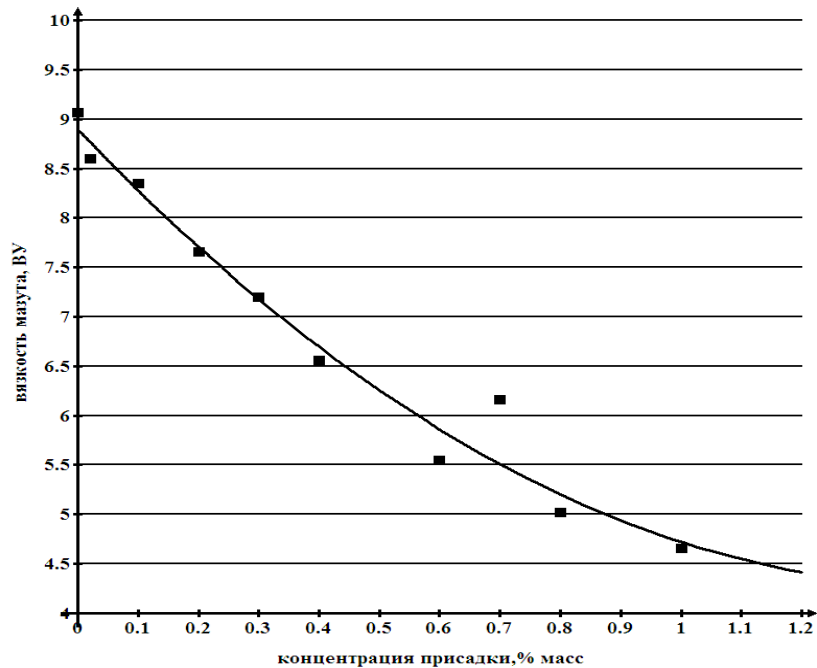


Рис.1. Зависимость условной вязкости мазута М100 от концентрации присадки: ■ - экспериментальные значения, линия – расчетная кривая

$$y(x) = 2,2127243 * x^2 - 6,3873071 * x + 8,8964319$$

$$R^2 = 0,9700229; \sigma = 0,2671993,$$

где  $y(x)$  - условная вязкость при  $t=90$  °С, °ВУ,  $x$  – концентрация присадки в мазуте, % (масс.),  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $\sigma$  – стандартное отклонение.

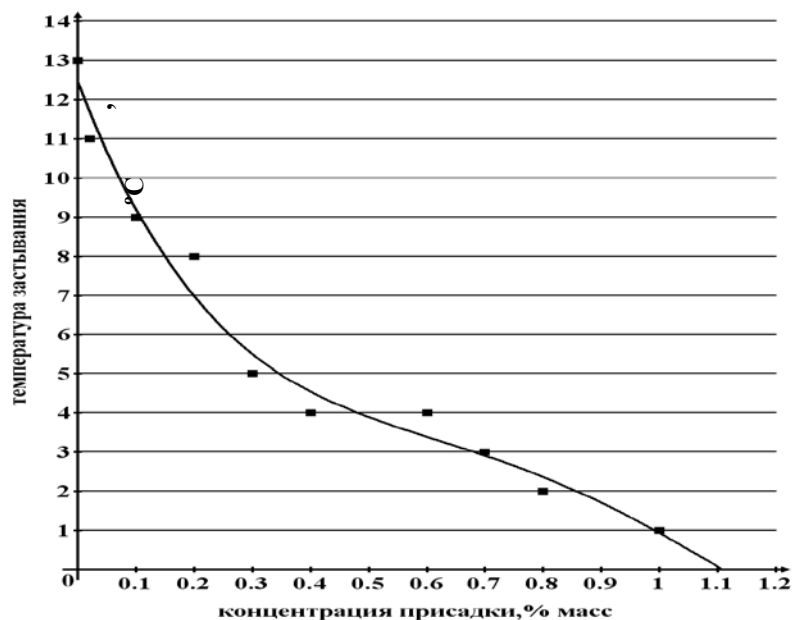


Рис. 2. Зависимость температуры застывания мазута М100 от концентрации присадки: ■ - экспериментальные значения, линия – расчетная кривая

$$y(x) = 16,1400287 * x^4 - 56,2523611 * x^3 + 67,3286614 * x^2 - 38,7390122 * x + 12,4565847$$

$$R^2 = 0,9797783; \sigma = 0,5727477,$$

где  $y(x)$  – температура застывания, °С,  $x$  – концентрация присадки в мазуте, % (масс.),  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $\sigma$  – стандартное отклонение.

Согласно полученным экспериментальным данным, можно предположить следующий механизм влияния присадки на реологические свойства мазута: присадка модифицирует на поверхности кристаллов парафинов таким образом, что они теряют способность к слипанию, в результате чего снижаются вязкость и температура застывания топочного мазута. В связи с этим уменьшаются энергетические затраты на подогрев мазута и на его перекачку по трубопроводам [1].

Для эффективного использования присадки к топочному мазуту в необходимо разработать принципиальную схему дозирования. При разработке схемы необходимо учесть, что обработка мазута присадками необходима как при хранении его в резервуарах, так и при подготовке непосредственно к сжиганию. Во всех случаях требуется обеспечить эффективное смешение присадки с топливом при наименьших энергетических и трудовых затратах.

С учетом вышеперечисленных требований разработана принципиальная схема дозирования присадки, которая представлена на рисунке 3.

Присадка может приготавливаться в баках 9 снабженных датчиком температуры 5, определяющим температуру присадки. Нагрев присадки, находящейся в емкости, допускается до температуры 50°С. Также емкости для хранения оборудованы перемешивающим устройством 4, в качестве которого используются обычные мешалки или циркуляционное перемешивание. Емкость для хранения присадки имеет датчик уровня 3, с помощью него программирующий логический контроллер 1 отслеживает содержание присадки в емкости. В случае заполнения емкости открывается выпускной клапан 2 и выводится излишек присадки. После выхода из емкости хранения присадка проходит через фильтр 6, который предназначен для очистки от механических примесей, затем очищенная присадка перекачивается насосом-дозатором 8. На линии подачи присадки установлен расходомер 10, по его показателям контроллер контролирует расход присадки перед подачей ее в мазутопровод. Также установлен обратный клапан 11, предотвращающий обратное течение присадки на линии подачи.

На основном мазутопроводе установлен расходомер 10. Из всего объема основного потока мазута отбирается 2% для смешения с присадкой. Этот поток перекачивается насосом 14. Перед добавлением присадки в мазут, последний в свою очередь, проходит через паровой подогреватель 12, который предназначен для подогрева мазута и тем самым для предотвращения его застывания, а также для обеспечения необходимых значений вязкости. После прохождения через паровой подогреватель измеряется температура мазута и добавляется присадка в мазутопровод.

Мазут, в который введена присадка, должен быть нагрет до температуры 50°C-70°C.

Перемешивание мазута и присадки осуществляется посредством статического миксера 13. Далее смесь мазута и присадки подается в основной мазутопровод.

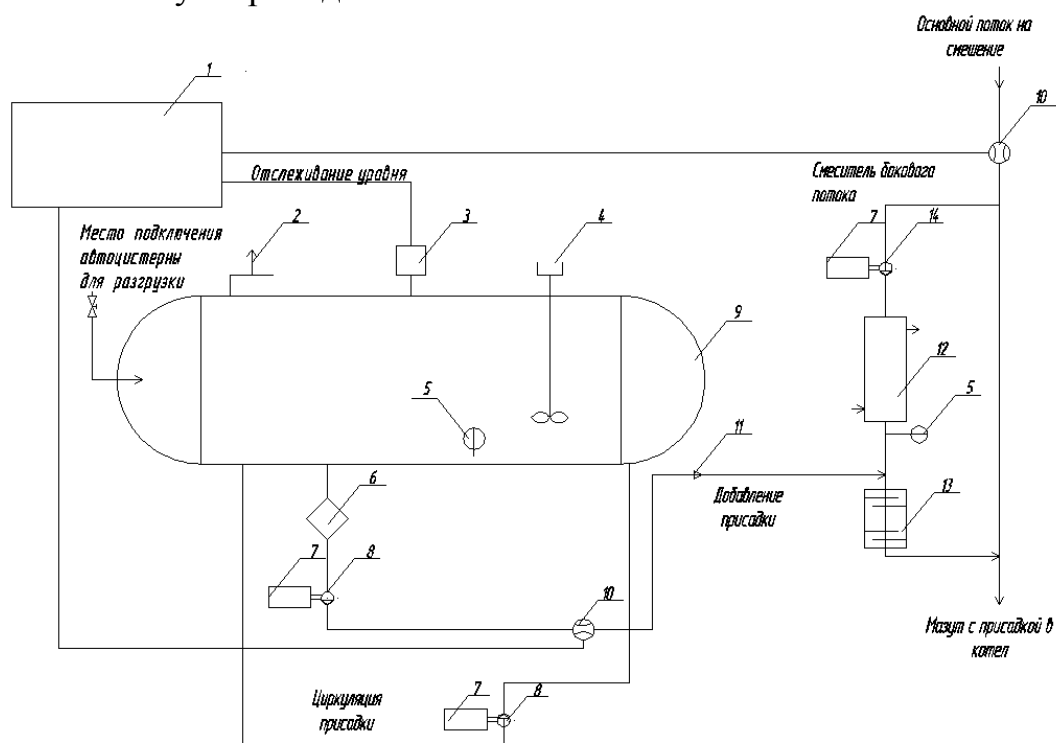


Рис. 3. Технологическая схема дозирования присадки в мазут.

Разработанная нами технологическая схема дозирования жидкой присадки позволит в автоматическом режиме организовать приготовление присадки, добавление ее в мазут, тем самым обеспечит высокую надежность работы и экономичность котла.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Данилов А.М. Применение присадок в топливах для автомобилей: Справ. изд.-М.:Химия 2000-232 с.:ил.

2. Гумеров А.Г., Карамышев В.Г., Тогашева А.Р., Хазипов Р.Х. Применение деэмульгаторов в процессах подготовки нефти к транспорту // Тр. ин-та проблем транспорта энергоресурсов.- 2006.- вып. 66.- С.27-54.
3. Зверева Э.Р., Мутугуллина И.А., Зиннатуллина Р.В., Хабibuллина А.Р. Улучшение реологических свойств топочных мазутов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012 №7-8. С.28-33

Научный руководитель: Э.Р. Зверева, канд.хим.наук, профессор Казанского государственного энергетического университета.

### **РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УГОЛЬНОЙ ПГУ**

Г.И. Худякова, П.А. Ральников

Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

В настоящее время возрастает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. Это связано, во-первых, со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, во-вторых, с достаточно высокой ценой этих энергоресурсов. Перспективным направлением является ПГУ на твердом топливе.

Разрабатываемая угольная парогазовая установка (ПГУ) (рисунок 1) укрупненно состоит из двух частей: газоподготавливающей и газоиспользующей.

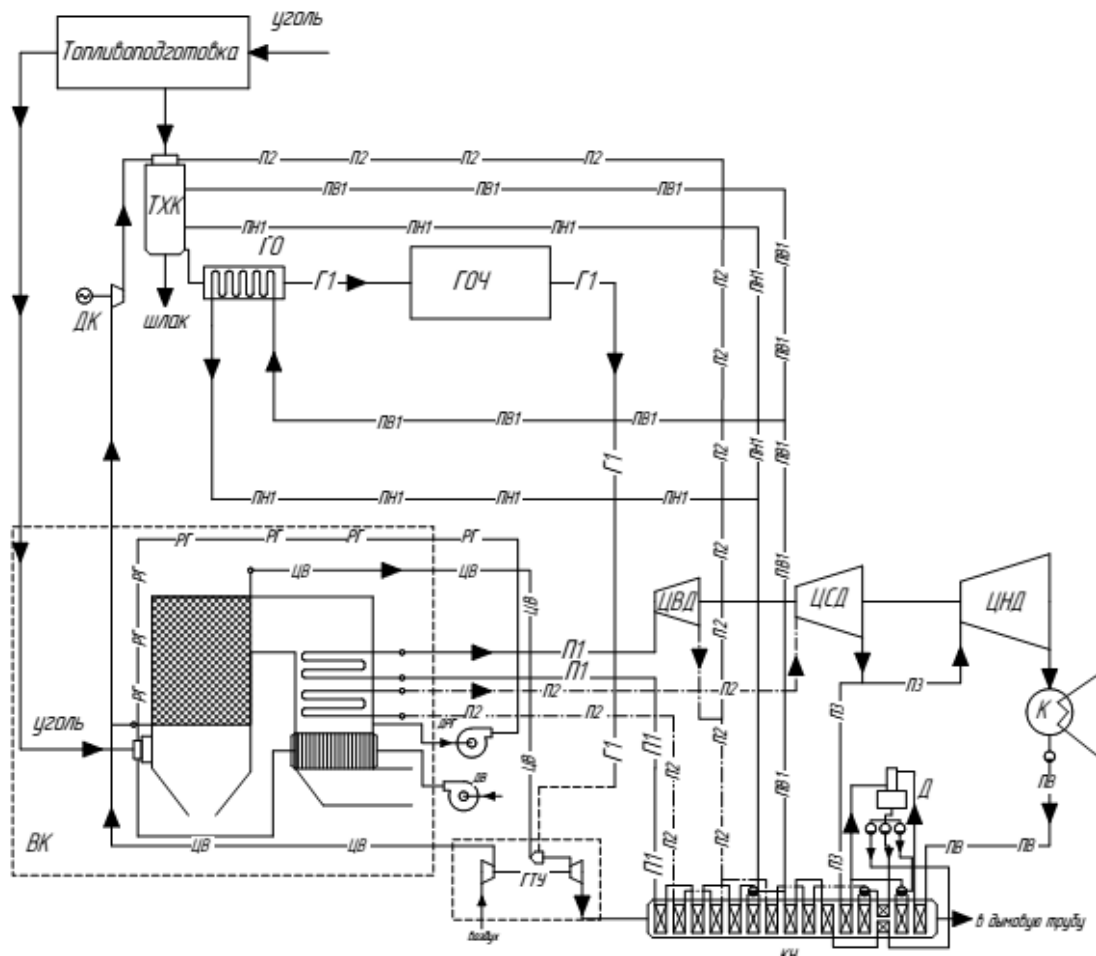


Рис. 1. Технологическая схема угольной парогазовой установки. ГТУ – газотурбинная установка; КУ – котел-утилизатор; ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндр соответственно высокого, среднего и низкого давления паровой турбины (ПТ); ВК – воздушный котел; Д – деаэратор; К – конденсатор; ДВ – дутьевой вентилятор; ПН – питательный насос, ТХК – реактор термохимической конверсии; ГО – газоохладитель; ГОЧ – система газоочистки.

Газоиспользующая часть состоит из энергетического оборудования ПГУ (газовая и паровая турбины, котел-утилизатор). Газоподготавливающая часть включает в себя узел термохимической конверсии топлива вместе с системой газоохлаждения и газоочистки. В ПГУ нагрев рабочего тела газовой турбины разделен на две стадии: первая – в высокотемпературном воздухонагревателе, вторая – в камере догрева газовой турбины. Сжатый в компрессоре ГТУ цикловый воздух поступает в рекуперативный теплообменник, где он нагревается до максимально возможной по условиям длительной и надежной работы узла температуры. Далее он поступает в камеру догрева, где при помощи присадки топливного газа температура повышается до уровня температуры, характерного для используемого класса газовой турбины.

ны. После ГТУ дымовые газы поступают в котел-утилизатор, где теплота выхлопа утилизируется в паротурбинный цикл. Высокотемпературный воздухонагреватель установлен в качестве поверхностей нагрева в обычном пылеугольном котле. Ввиду высокой температуры циклового воздуха после сжатия в компрессоре не представляется возможным охладить дымовые газы воздушного котла только им, поэтому используется дополнительное охлаждение дымовых газов в пароперегревательных поверхностях.

В составе ПГУ используется ГТУ типа Alstom GT13E2 с отбором воздуха на газификацию, трехконтурный котел-утилизатор и паровая турбина высокого давления с промежуточным перегревом пара, а также нестандартное оборудование. К нестандартному оборудованию относится вновь разрабатываемый высокотемпературный воздухонагреватель для нагрева циклового воздуха, который рассматривается в составе воздушного котла, а также камера сгорания синтез-газа, перепроектированная на сжигание низкокалорийного газа в высоконагретом окислителе. Мощность газовой турбины с модернизированной камерой сгорания составит 177 МВт.

В ходе работы рассмотрены вариации, связанные с изменением компоновки поверхностей нагрева воздушного котла, дополнительно рассмотрено влияние типа газоочистки на КПД схемы (квенчинг, холодная газоочистка, горячая газоочистка). Расчет технологической схемы ПГУ был проведен при помощи лицензированного программного комплекса ThermoLow.

Были рассмотрены 3 вида компоновок воздушного котла:

1. с пароводяной частью. Особенностью данной компоновки служит использование пароводяных поверхностей в топке для снятия избыточной по условиям надежной работы воздухонагревателя температуры.
2. с использованием рециркуляции дымовых газов. Вместо пароводяных поверхностей в топочную камеру осуществляется рециркуляция дымовых газов из конвективной шахты. Использование такого решения позволяет убрать пароводяные поверхности в топке, однако одновременно увеличиваются конвективные поверхности нагрева. В их качестве выступают пароперегревательные поверхности
3. «чисто» воздушный котел. Данная компоновка отражает развитие материалов для воздухонагревателя. Совместно с отказом от рециркуляции дымовых газов температура нагрева воздуха повышается с 800 (в предыдущих компоновках) до 1000°C.

В результате проработки различных компоновок воздушного котла было выявлено, что наличие значительного количества пароводяных поверхностей в топочной камере, характерное для первого типа компоновки, значительно снижает степень бинарности ПГУ, отрицательно сказываясь как на КПД, так и на возможных перспективах схемы. Второй тип компоновки позволяет снизить поток теплоты из воздушного котла, минуя газотурбинный цикл, на ~10 %, а также позволяет отказаться от дожигания перед котлом-утилизатором, использование которого продиктовано низкой температурой выхлопных газов ГТУ (505°С). Для «чисто» воздушного котла характерно повышение температуры нагрева воздуха с 800 до 1000 °С, отказ от рециркуляции из предположения повышения жаростойкости материалов, используемых для высокотемпературного воздухонагревателя. Такая компоновка совместно с более экономичной газовой турбиной позволяет сократить отставание угольных ПГУ от газотопливных до 3-5 %.

Для исследования влияния типа газоочистки на экономичность схемы рассмотрены 3 компоновки ПГУ:

1. с квенчингом ;
2. с холодной газоочисткой;
3. с горячей газоочисткой.

В качестве модели воздушного котла использован 2 тип компоновки поверхностей нагрева. Результаты расчета вариантов представлены на рисунке 2. Для сравнения приведены данные по КПД IGCC и ПГУ на природном газе, рассчитанные для аналогичных начальных условий.

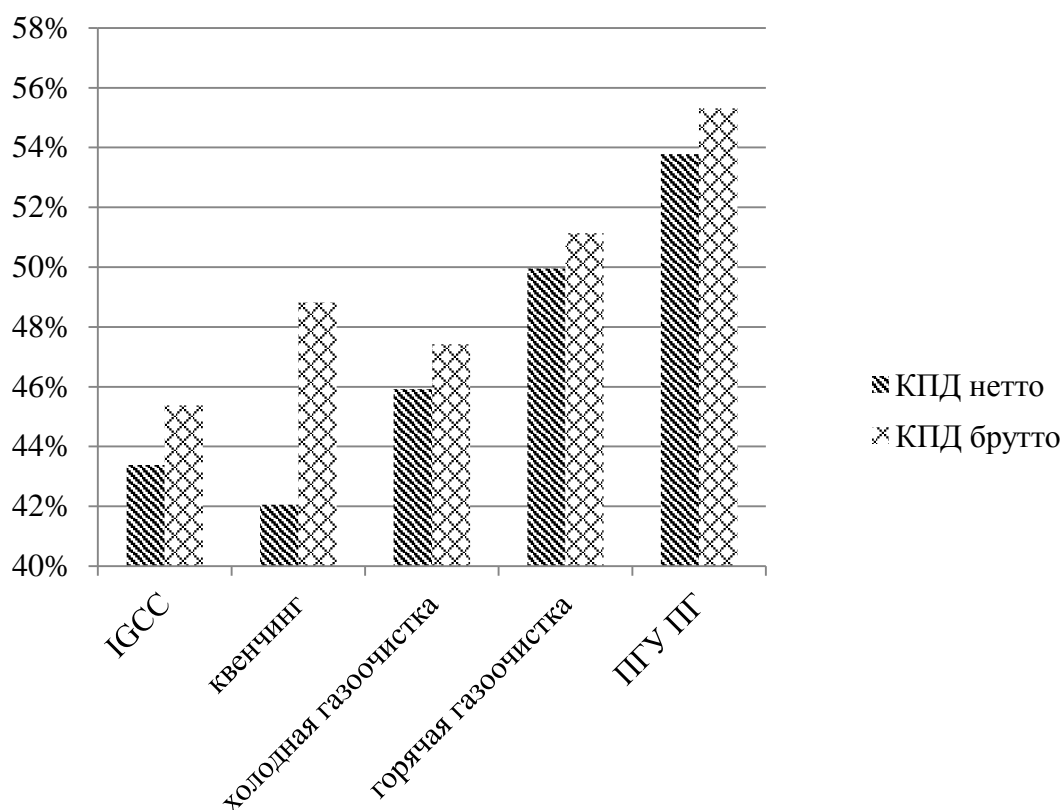


Рис. 2. Влияние газоочистки на энергетическую эффективность ПГУ

Схема ПГУ с водяным квенчингом показывает расчетную энергетическую эффективность ниже IGCC. Переход на холодную газоочистку при прочих равных условиях позволяет преодолеть уровень IGCC. Реализация варианта с горячей системой газоочистки увеличивает КПД установки по сравнению с вариантом с квенчингом на 8 %, что позволяет рекомендовать схему к дальнейшей проработке.

В результате исследования было выявлено влияние компоновок воздушного котла и типа газоочистки на энергетическую эффективность ПГУ. На основании этого можно сделать вывод: разрабатываемая схема угольной ПГУ с двухступенчатой подготовкой рабочего тела для газовой турбины по энергетической эффективности конкурентоспособна с IGCC и современными пылеугольными энергоблоками. Использование высоконагретого окислителя уменьшает размеры газификационной части ПГУ, а также снижает требования в части теплоты сгорания синтез-газа, что позволяет вовлечь в топливную базу ПГУ низкосортные топлива.

Научный руководитель: С.И. Гордеев, инженер кафедры Тепловых электрических станций Уральский энергетический институт Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.



## РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ИХ УНИЧТОЖЕНИЯ

М.В. Кузнецов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТЭС, группа 5021

Радиоактивные отходы (РАО) — отходы, которые содержат радиоактивные изотопы химических элементов и не имеют практической ценности.

Они образуются в разных формах с весьма разнообразными характеристиками, такими, как концентрации и периоды полураспада составляющих их радионуклидов. Эти отходы могут образовываться: В газообразной форме, как, например, вентиляционные выбросы установок, где обрабатываются радиоактивные материалы; В твёрдой форме (загрязнённые расходные материалы, стеклянная посуда из больниц, медицинских исследовательских установок и радиофармацевтических лабораторий, остеклованные отходы от переработки топлива или отработавшего топлива от АЭС, когда оно считается отходами). В жидкой форме, начиная от растворов сцинтилляционных счётчиков из исследовательских установок до жидких высокоактивных отходов, образующихся при переработке отработавшего топлива;

Выделяют следующие виды источников появления радиоактивных отходов в человеческой деятельности:

1. *ПИР (природные источники радиации)*. Долгоживущие нуклиды, такие как калий-40, рубидий-87 (являются бета-излучателями), а также уран-238, торий-232 (испускают альфа-частицы) и их продукты распада.
2. *Промышленные РАО*. Промышленные РАО могут содержать источники альфа-, бета-, нейтронного или гамма-излучения.
3. *Нефть и газ*. Побочные продукты нефтяной и газовой промышленности часто содержат радий и продукты его распада.
4. *Уголь*. Уголь содержит малое количество радионуклидов, таких как уран или торий, однако их концентрация увеличивается в зольной пыли, поскольку они почти не горят.
5. *Обогащение полезных ископаемых*. Отходы, полученные при обогащении полезных ископаемых, могут быть радиоактивными.
6. *Медицинские РАО*. В радиоактивных медицинских отходах преобладают источники бета - и гамма-лучей. В диагности-

ческой ядерной медицине используются короткоживущие гамма-излучатели, такие как технеций-99m.

Основные стадии обращения с радиоактивными отходами.

На данный момент сформирован ряд принципов, нацеленных на такое обращение с радиоактивными отходами, которое обеспечит защиту здоровья человека и охрану окружающей среды сейчас и в будущем, не налагая чрезмерного бремени на будущие поколения.

Основными стадиями обращения с радиоактивными отходами являются:

1. *Хранение*. При хранении радиоактивных отходов их следует содержать так, чтобы обеспечивались их изоляция от окружающего мира, охрана и мониторинг окружающей среды.
2. *Предварительная обработка* отходов является первым шагом обращения с отходами. Она включает сбор, регулирование химического состава и дезактивацию.
3. *Обработка* радиоактивных отходов включает операции, цель которых - повышение безопасности или экономичности путем изменения характеристик радиоактивных отходов. Основные принципы обработки: уменьшение объёма, удаление радионуклидов и изменение состава.
4. *Кондиционирование* - переработка радиоактивных отходов в форму, приемлемую для перемещения, перевозки, хранения и захоронения. В многих случаях обработка и кондиционирование проводятся в тесной связи друг с другом.
5. *Захоронение* – помещение радиоактивных отходов в установку для захоронения при соответствующем обеспечении безопасности без намерения их изъятия и без обеспечения долгосрочного наблюдения за хранилищем и технического обслуживания. Безопасность в основном достигается посредством концентрации и удержания.

#### **Технологии обращения.**

Обращение со среднеактивными РАО.

В РАО, среднеактивные отходы подвергаются ионному обмену. Уже менее активное тело после обработки до конца обезвреживают. В качестве флокулянта могут использовать гидроксид. Это делается с целью удаления РАО металлов из водных растворов. После всех операций радиоизотопы абсорбируют гидроксидом железа, а осадок, полученный в следствие абсорбции, помещают в металлический барабан, там он перемешивается вместе с цементом, из этого образуется твердая смесь. Но что бы быть уверенным до конца в стабильности и качестве, цемент делают из зольной пыли, а также из печного шлака

или портландцемента (строительный цемент состоит из портландцемента, гравия и песка).

Обращение с высокоактивными РАО.

Для бережного хранения РАО используют специальные резервуары. Отработанное ядерное топливо помещают в хранилища с сухотарными бочками. В отходах разрушаются короткоживущие изотопы, после чего они подвергаются дальнейшей переработки.

Для более долгого хранения радиоактивных отходов их необходимо консервировать в форме, которая не должна вступать в реакции и подвергаться разрушению длительное время. Самым популярным способом достижения этого состояния безусловно является витрификация (по-другому остеклование). В настоящее время в городе Селлафилде (Великобритания) радиоактивные смешивают с белым сахаром а после кальцинируют.

В вещество, которое получилось, периодически добавляют измельченное стекло. В итоге новая субстанция, при затвердевании связывает отходы со стеклянной матрицей. Это вещество в состоянии однородной массы вливается в цилиндры из легированной стали. Постепенно охлаждаясь, жидкость начинает твердеть, превращаясь в подобие стекла, это стекло является крайне устойчивым к воздействию воды. По данным авторитетного международного технологического общества, необходимо миллионы лет, чтобы хотя бы 12 % этого стекла растворилось в воде. После заполнения цилиндра необходимо плотно упаковать и проверить на внешнее загрязнение. Такое состояние радиоактивных отходов очень долгое время остается неизменным. Черное стекло внутри цилиндра имеет гладкую поверхность. Сахар добавляется для предотвращения образования летучего вещества  $RuO_4$ , содержащего радиоактивный рутений. Количество продуктов деления в стекле было ограничено, из-за этого некоторые элементы, такие как, например палладий, металлы платиновой группы и теллур, стремились образовать металлические фазы отдельно от стекла. Такой завод по витрификации есть в Германии. В 1997 году в 20 странах, обладающих большей частью мирового ядерного потенциала, запасы отработанного топлива в хранилищах внутри реакторов составляли 148 тыс. тонн, 59 % из которых были утилизированы.

Проблема обращения с РАО является многогранной и сложной, носит комплексный характер. При ее решении необходимо учитывать различные факторы, в том числе возможное увеличение себестоимости продукции или услуг предприятий вследствие предъявления новых требований по хранению и обращению с РАО, применения специальных обязательных технологий обращения с РАО, многовариант-

ности способов обращения с РАО в зависимости от их удельной активности, физико-химического состояния, радионуклидного состава, объемов, токсичности, и условий по безопасному хранению и захоронению.

В настоящее время большинство отходов находится во временных хранилищах. Принято, что все образующиеся отходы следует хранить в течение 30-50 лет с возможностью продления срока хранения. Этот путь не ведет к окончательному безопасному решению проблемы и требует значительных затрат на эксплуатацию хранилищ без ясной перспективы ликвидации последних. При этом окончательное решение проблемы накопления РАО перекладывается на последующие поколения.

Альтернативой является внедрение принципа окончательной изоляции РАО, при котором риски возникновения аварий и негативного воздействия РАО на человека и окружающую среду снижаются ориентировочно на 2-3 порядка. Следовательно, основным способом изоляции должно быть не длительное хранение, а окончательное захоронение отходов.

В отрасли отсутствуют типовые решения переработки и подготовки РАО к захоронению. Технологии переработки и кондиционирования РАО, а соответственно и установки переработки, создавались с учетом специфики образующихся РАО на каждом предприятии и в большинстве своем не являются унифицированными и универсальными.

Комплекс описанных проблем в сфере обращения с РАО обуславливает необходимость модернизации действующей системы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Д. Никитин, Ю. Новиков "Окружающая среда и человек", 1986 г.
2. [[http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%E0%E4%E8%E0%EA%F2%E8%E2%ED%FB%E5\\_%EE%F2%F5%EE%E4%FB](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%E0%E4%E8%E0%EA%F2%E8%E2%ED%FB%E5_%EE%F2%F5%EE%E4%FB)].
3. [<http://greentam.narod.ru/anti.html>].
4. [<http://www.yabloko.ru/Themes/Nuclear/>].
5. В.В. Бадев, Ю.А. Егоров, С.В. Казаков "Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС", Москва, Энергоатомиздат, 1990 г.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко ассистент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А.А. Францева

Новосибирский государственный технический университет

Перспективным направлением развития теплоснабжения является создание комбинированных систем на базе ТЭЦ с термотрансформаторами [1].

На рис. 1 приведена принципиальная тепловая схема теплофикационного энергоблока ТЭЦ в системе комбинированного теплоснабжения с газосетевым подогревателем и фреоновыми термотрансформаторами [2].

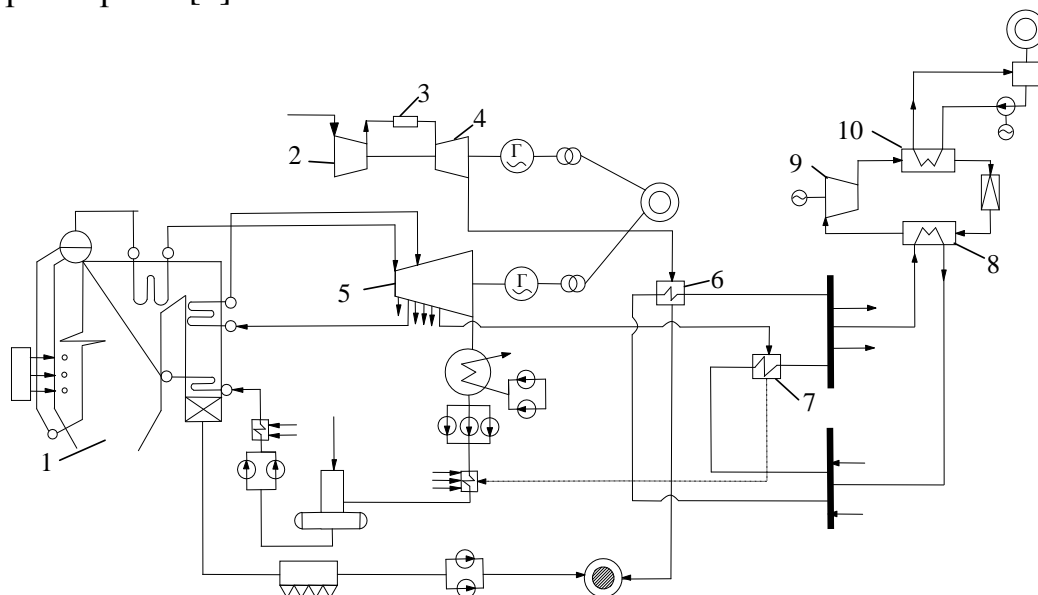


Рис. 1. Технологическая схема энергоблока ТЭЦ в системе комбинированного теплоснабжения с газосетевыми подогревателями и внутриквартальными фреоновыми термотрансформаторами: 1-паровой котел; 2-компрессор газотурбинной установки; 3-камера сгорания; 4-газовая турбина; 5-паровая турбина; 6-газосетевой подогреватель; 7-традиционный сетевой подогреватель; 8-испаритель; 9-компрессор; 10-конденсатор.

По этой схеме в течение всего года сетевая вода параллельно подогревается до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  уходящими из газовой турбины (4) газами в газосетевом подогревателе (ГСП) (6) и паром из теплофикационного отбора турбины в традиционном сетевом подогревателе (СП) (7). К фреоновым термотрансформаторам (8), осуществляющим качественное регулирование при теплоснабжении внутриквартальных теплопотребителей (Q), сетевая вода подводится из тепловых центров. При



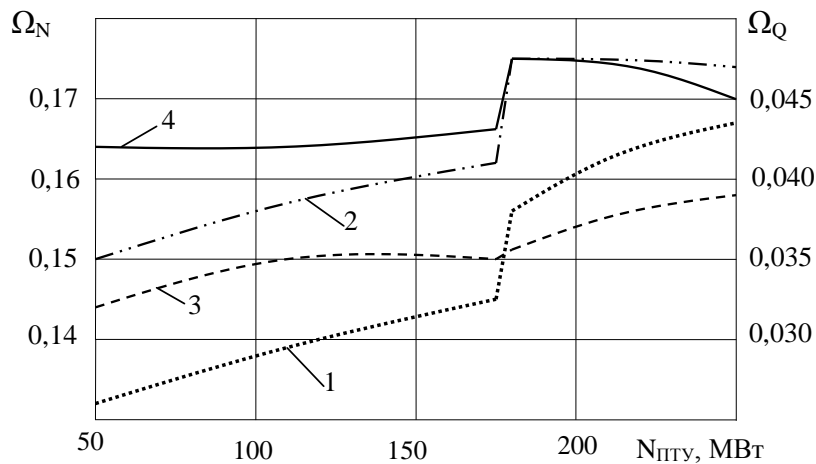


Рис. 3. Техничко-экономические КПД по отпуску электро- и теплоэнергии  $\Omega_N, \Omega_Q$  от парогазовой ТЭЦ с ГСП и термотрансформаторами: 1,2- $\Omega_N$ ; 3,4- $\Omega_Q$  при стандартных и оптимальных параметрах;  $N_{ПГУ}$  - мощность паротурбинной установки ПГУ.

Применение такой системы теплоснабжения обуславливает переход ТЭЦ с нормативного температурного графика к графику с пониженными температурами прямой и обратной сетевой воды и уменьшение почти в два раза теплопотерь в магистральных теплопроводах. Низкие температуры сетевой воды в магистральных теплопроводах позволяют использовать для них дешевые трубы из синтетических материалов не подверженные коррозии и с долговечностью до 50 лет. Капиталовложения уменьшаются по сравнению с традиционным вариантом. При применении ТТ-технологии сокращаются сроки ввода теплогенерирующих мощностей, так как установка термотрансформаторов может рассматриваться по схеме крышных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями // Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г., Овчинников Ю.В., Ловцов А.А., Коваленко П.Ю., Зыкова Н.Г., Вихман О.А., Бородихин И.В. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. - 528 с.
2. Пат. № 110459 РФ, МПК F24D 3/08. Система централизованного теплоснабжения / Ноздренко Г. В., Щинников П. А., Францева А. А. - Оpubл. 20.11.2011. - Бюл. № 32.

Научный руководитель: Г.В. Ноздренко, профессор, д.т.н кафедры ТЭС факультет энергетики Новосибирский государственный технический университет.

## ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БИЙСКОЙ ТЭЦ-1 И ЕГО АНАЛИЗ

А.Д. Козырев

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ2В

Организация контроля качества электроэнергии и проведение его анализа – один из признаков интеллектуальной энергосистемы и является одним из мероприятий, связанных с энергосбережением, на основании анализа показателей качества электроэнергии можно наметить конкретные рекомендации по их улучшению. К контролю качества электроэнергии (КЭ) относятся следующие задачи:

- проверка соответствия показателей качества электроэнергии (ПКЭ) требованиям ГОСТа 13109-97 «Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения» [1];
- выяснение причин несоответствия ПКЭ ГОСТу;
- определение ущерба от несоответствия требованиям КЭ;
- выявление виновных в нарушениях требования к отдельным ПКЭ и предъявление к ним экономических штрафных санкций.

Согласно [1] при контроле ПКЭ устанавливаются следующие основные правила:

- длительность контроля большинства ПКЭ – не менее суток;
- требуется соблюдение двух видов норм ПКЭ: нормально допустимые и предельно допустимые.

ПКЭ считаются соответствующими ГОСТу 13109-97, если усредненные (интегрированные) оценки не выходят за пределы допустимой нормы, а в течение не менее 95 % времени каждых суток значения ПКЭ не выходят за пределы нормально допустимых значений.

Оценка режимов электропотребления и показателей качества электроэнергии проводилась на основании энергетического обследования системы электроснабжения 6 и 0,4 кВ собственных нужд (СН) электростанции путем выборочного (в 37 узлах системы питания) инструментального контроля с использованием прибора-анализатора типа DRANETZ PP1-8000 (США) – далее DRANETZ.

Анализатор DRANETZ позволяет получать текущие значения параметров режима электрической сети и данные для расчета ПКЭ, с последующей выдачей информации на дисплей или принтер в виде протоколов измерений или графического изображения (графики, век-



торные диаграммы, спектрограммы высших гармоник, гистограммы, осциллограммы напряжений и токов и т.п.).

Анализатор DRANETZ при выдаче цифровой информации использует следующие обозначения:

PHV – междуфазное напряжение (В, кВ); I – ток (А, кА); W – активная мощность (кВт, МВт); UAR – реактивная мощность (кВА, МВАр); UA – полная мощность (кВА, МВА); PF –  $\cos \varphi$ ; Uthd – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения; Ithd – коэффициент искажения синусоидальности кривой тока; F – частота (Гц); А, В, С – фазы сети; D – нулевой провод.

Прибор DRANETZ не вычисляет следующие параметры режима и ПКЭ:  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$ ,  $\Delta U$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_0$  – поэтому они были определены по формулам:

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}), \quad \Delta U = \frac{U - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100, \\ U_2 = 0,62(U_{НБ} - U_{НМ}),$$

где  $U_{НБ}$ ,  $U_{НМ}$  – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех междуфазных напряжений, В, кВ;  $\Delta U$  – установившееся отклонение напряжений;  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;  $K_{0U}$  – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;  $U_1$  – напряжение прямой последовательности;  $U_2$  – напряжение обратной последовательности;  $U_0$  – напряжение нулевой последовательности;

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{НОМ}}, \quad U_0 = 0,62(U_{НБ\phi} - U_{НМ\phi}),$$

где  $U_{НБ\phi}$ ,  $U_{НМ\phi}$  – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех фазных напряжений, В, кВ;

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{НОМ.\phi}} \cdot 100, \quad K_{ЗАГР.} = \frac{S_{НАГР.}}{S_{НОМ.ТР.}} = \frac{I}{I_{НОМ.ТР.}},$$

где  $K_{ЗАГР.}$  – коэффициент загрузки трансформаторов СН.

Результаты измерений и расчетов, протоколы измерений, их реестр и графическая информация приведены в [2].

Ниже приведены обобщенные результаты измерений и расчетов: **Отклонения напряжения.** По нормам КЭ [1] нормально допустимые  $\Delta U = \pm 5 \%$ , предельно допустимые -  $\Delta U = \pm 10 \%$ .

Предельно допустимые значения отклонений напряжения отмечены в узлах электрической сети СН: ТГ-3, 6кВ; ТГ-7, 6 кВ, XIV секция шин; ТГ-7, 6 кВ, XV сш, Тсн-1 (0,4 кВ); Тсн-14 (0,4 кВ); Тсн-15 (0,4 кВ); Тсн-28 (0,4 кВ); Тсн- 29 (0,4 кВ); Тсн - 32 (0,4 кВ). В осталь-

ных узлах отклонения напряжения соответствуют нормально допустимым значениям.

**Несимметрия напряжений.** По нормам качества электроэнергии нормально допустимые  $K_{2U} = 2 \%$ ,  $K_{0U} = 2\%$ , предельно допустимые  $K_{2U} = 4 \%$ ,  $K_{0U} = 4 \%$ .

Значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности изменялись в пределах от 0,114% до 0,783 %, только у трансформатора СН № 32  $K_{2U} = 5, 35 \%$ .

Значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности изменялись в пределах от 0,254 % до 1,775 %, только у трансформатора СН №32  $K_{0U} = 8,96 \%$ , а у ТСН №29  $K_{0U} = 2,395\%$  (что соответствует предельно допустимому значению  $K_{0U}$ ).

**Несинусоидальность напряжения.** По нормам качества электроэнергии нормально допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U = 8\%$  (для электрических сетей 0,38 кВ),  $K_U = 5\%$  (для  $U_{ном} = 6 - 20$  кВ); предельно допустимые –  $K_U = 12 \%$  (0,38 кВ),  $K_U = 8 \%$  (6 - 20 кВ).

Нормально допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения отмечены во всех узлах электрических сетей СН 6 кВ и 0,4 кВ (изменения от 0,258 % до 3,281 %). Допустимые и действительные значения коэффициентов n-ой гармонической составляющей напряжения приведены в таблице:

Нечетные гармоники, не кратные 3					Нечетные гармоники, кратные 3				
n	0,38 кВ		6-20 кВ		n	0,38 кВ		6-20 кВ	
	Норма %	Изменения, %	Норма %	Изменения, %		Норма %	Изменения, %	Норма %	Изменения, %
5	6	0,08-0,93	4	0,1-1,21	3	5	0,05-3,09	3	0,05-2,02
7	5	0,03-0,52	3	0,12-1,2	9	1,5	0,04-0,18	1	0,0 - 0,9
11	3.5	0,04-0,36	2	0,15-0,81	15	0,3	-	0,3	-
13	3	0 - 0,24	2	0,04-0,6					

Все наблюдаемые значения  $K_{U(n)}$  не выходят за пределы допустимых значений.

Проведенный анализ качества напряжений в системе СН электростанции выявил «слабые места» (отклонения от норм ПКЭ выше допустимых) в электрической сети СН, что позволило разработать ряд

технических мероприятий по устранению этих недостатков. По результатам инструментального обследования и анализа режимов электропотребления и качества электроэнергии в системе СН обследованной ТЭЦ можно сделать следующие выводы:

- Низкие коэффициенты загрузки большого количества трансформаторов СН.
- Низкое значение  $\cos\varphi$  большинства электроприемников, что соответствует существенному потреблению реактивной мощности, в том числе по причине малой загрузки электрооборудования (электродвигателей) и отсутствия компенсации реактивной мощности в сети 0,4 кВ. Организация контроля за качеством электроэнергии позволяет оптимизировать уровни напряжения на шинах СН, что дает возможность снизить на 0,65% [3] расход электроэнергии на СН. Общая экономия электроэнергии составит 0,0325% и на столько же снизится расход топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии. В абсолютных величинах экономия электроэнергии на СН равна 2,22 млн. кВт·ч, а уменьшение расхода топлива на выработку 1 кВт·ч, выдаваемой с шин электроэнергии, - 0,5 гут/кВт·ч.

Это можно достигнуть за счет:

- контроля и регулирования напряжения на выводах генераторов;
- контроля напряжения на секциях шин СН.

Качество электроэнергии по всем измеренным показателям на всех обследованных объектах СН соответствует требованиям ГОСТ 13109-97.

Интеллектуальная сеть объединяет в себе все возможности производства и хранения энергии, делает возможным внедрение новых продуктов, услуг и рынков, оптимизирует использование устройств и функционирует эффективно, обеспечивает качество электроэнергии для цифровой экономики.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск: ИПК Изд. стандартов, 1988. – 31 с.
2. Отчет о научно-исследовательской работе по х/д № 7-ЭО от 20.02.2003 г.

3. Аббасова Э.М., Голоднов Ю.М., Зильберман В.А. и др. Собственные нужды тепловых электростанций, Под ред. Ю.М.Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.

Научный руководитель: Ю.А. Краснятов, к.т.н., доцент, каф. ЭСиЭ, ЭНИН, ТПУ.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

Н.В. Миронова

Новосибирский государственный технический университет

Энергетическая ситуация в мире диктует необходимость более бережного и ответственного отношения к ископаемым топливам, активного использования в балансе угольного топлива, разработки безотходных угольных технологий, экологически безопасных технологий использования топлива, повышения КПД тепловых электрических станций, вовлечения в производство низкосортных энергетических топлив.

Наиболее полно энергетической стратегии при этом соответствуют технологии с газификацией угля (в т.ч. в виде водоугольной суспензии под высоким давлением), оптимизация процессов сжигания углей и их смесей с биомассой и бытовыми отходами. Использование в качестве газифицируемого сырья смеси угля с биомассой, остатков переработки нефти и других отходов обеспечивают его минимальную стоимость.

Область применения газификаторов: для парогазовых установок, работающих на твердом топливе, а так же для современных газовых паротурбинных энергоблоков при переводе их на твердое топливо.

Научная новизна работы заключается в исследовании параметров газификаторов работающих на сибирских углях, в том числе и на новом кавитационном угольном топливе.

Задачи исследования:

1. Разработка методики, расчет параметров поточных газификаторов на твердом топливе.
2. Определение и анализ параметров поточных газификаторов, работающих на сибирских углях, и их эффективность.
3. Разработка рекомендаций по выбору рациональных параметров поточных газификаторов.

В данной работе рассматриваются поточные газификаторы твердого топлива, работающие по технологиям Копперса-Тотцека и Тексако. Проводятся расчеты параметров газификации кавитационного жидкого топлива в газификаторе Тексако.

По технологии Копперса-Тотцека твердые топлива газифицируют кислородом и водяным паром при атмосферном давлении в режиме прямотока (т.е. сырье и газифицирующий агент движутся в одном направлении). Схема типичного газификатора этого типа представлена на (Рис. 1). Данная технология позволяет перерабатывать любой уголь, размером не более 0,1 мм. Температура размягчения золы не имеет принципиального значения, так как в данной технологии зола удаляется в виде жидкого шлака. Состав сырого газа изменяется в следующих пределах (% об.):  $\text{CO}$  – 55-66;  $\text{H}_2$  – 21-32;  $\text{CO}_2$  – 7-12;  $\text{N}_2$  – около 1;  $\text{H}_2\text{S}$  – 0,5-1;  $\text{CH}_4$  – 0,1.[1]

Теплота сгорания газа составляет 10-12 МДж/м<sup>3</sup>. При использовании низкорекреационного топлива (например, кокса) содержание  $\text{CO}_2$  повышается, а  $\text{H}_2$  снижается, при высокорекреационном наблюдается противоположный эффект.

Процесс Копперса-Тотцека малочувствителен к изменению характеристик твердого сырья. Исходный уголь, предварительно измельченный и высушенный, через шнековые питатели поступает в смесительную головку, где смешивается с парокислородным потоком и вдувается в горелки газогенератора.

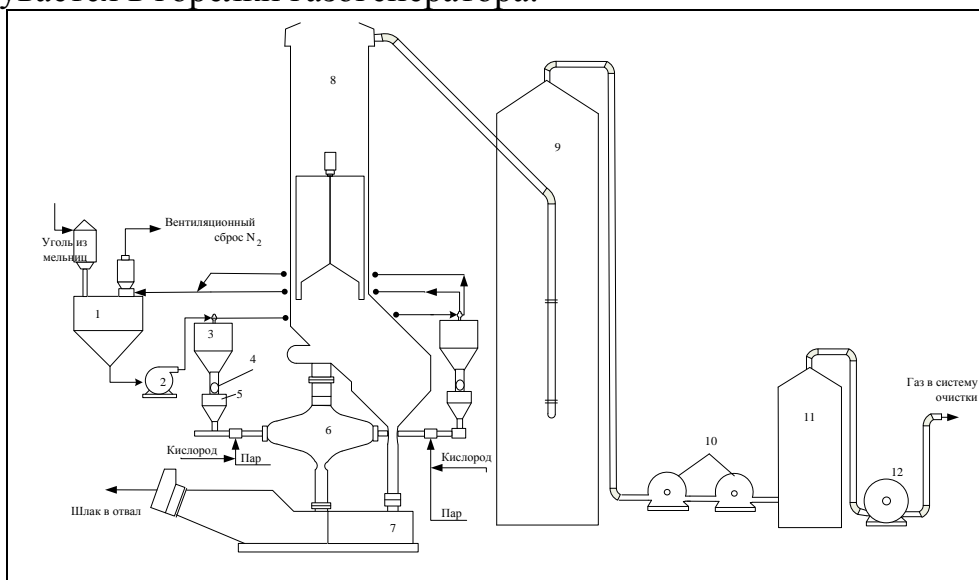


Рис. 1. Схема газификации угля по технологии Копперса-Тотцека: 1-бункер угольной пыли; 2- пневмонасос; 3- вспомогательный бункер; 4-вращающийся клапан; 5-питательный бункер; 6-реактор газификации; 7- шлаковый бак; 8- котел утилизатор; 9- колонна для промывки и охлаждения газа; 10-дезинтеграторы; 11- сепаратор; 12- вентилятор;

Вследствие высоких температур газификации (около 1500-1900°C) смола и фенолсодержащие продукты пиролиза окисляются непосредственно в реакторе, что значительно упрощает газоочистку. Примерно половина золы в виде жидкого шлака стекает вниз по стенкам газогенератора, отверждается в водоохлаждаемой емкости и гранулированная выводится из его нижней части. Другая половина в виде летучей золы уносится с получаемым газом. Чтобы воспрепятствовать зашлаковыванию котла-утилизатора, газ на выходе из газогенератора охлаждается водой до температуры, которая ниже точки размягчения золы.

Преимуществами подобных процессов являются более низкая стоимость пылевидного топлива по сравнению с крупнокусковым (технология Лурги) или фракционированным (технология Винклера), возможность перерабатывать спекающиеся угли без их предварительной подготовки; низкие эксплуатационные издержки. Кроме того, при высоких температурах смолы, масла и прочие высокомолекулярные соединения разлагаются, что упрощает очистку газа и сбросной воды. С точки зрения получения водорода процесс Копперса-Тотцека достаточно эффективен.

Недостатки связаны с высокими требованиями к материалам, из которых изготавливается газификатор и, соответственно, с большими капитальными затратами, повышенным расходом кислорода. При увеличении содержания балластных примесей в сырье (зола, влага) КПД газогенератора снижается более значительно по сравнению с другими технологиями газификации вследствие более высокой температуры процесса.

В промышленном масштабе широко используется процесс Тексако, который можно рассматривать как модификацию технологии Копперса-Тотцека. Особенностью является то, что уголь подается в реактор в виде водоугольной суспензии (60-70% угля). Это позволяет радикально решить некоторые проблемы, присущие методам газификации пылевидного топлива. Самым существенным преимуществом технологии Тексако является возможность проводить процесс при более высоком давлении (25 бар), что повышает производительность газификатора. В традиционных вариантах процесса Копперса-Тотцека попытки повысить давление в газогенераторе сталкиваются с трудно разрешимыми проблемами дозирования топлива и вывода шлака. Еще одним преимуществом технологии Тексако является возможность использовать вместо чистой воды стоки, содержащие органические компоненты, которые при температуре процесса 1300-1500 °C полностью превращаются в синтез-газ.[4]

Данная работа в настоящее время находится на начальном этапе, в ходе которого получены первые результаты по определению параметров газификации КЖТ в газификаторе Тексако. Состав синтез-газа (% об.): CO – 36; H<sub>2</sub> – 48; CO<sub>2</sub> – 10; N<sub>2</sub> – 0,7; SO<sub>2</sub> – 0,4; H<sub>2</sub>O – 5. Температура в реакционной зоне равна 974 К, а температура синтез-газа – 925 К. Процесс горения КЖТ в таком газификаторе заканчивается при 775 К, что существенно ниже температуры выгорания пылеугольного топлива.

Выводы по работе:

Предварительно рассмотрены поточные газификаторы перспективные для энергетики, и получены результаты расчета параметров газификации КЖТ.

Личный вклад в данную работу состоит в выполнении оценки параметров газификации кавитационного жидкого топлива по упрощенной методике, которая планируется как основа для разработки методики расчета газификаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузьмин А.Г. Комплексные технико-экономические исследования поточных газификаторов ПГУ // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. Часть 3 – С. 120-122.
2. Ноздренко Г.В. Эффективность применения в энергетике КАТЭКа экологически перспективных энерготехнологических блоков электростанций с новыми технологиями использования угля: Учеб. пособие / Новосиб. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1992. – 249 с.
3. Пугач Л.И., Серант Ф.А., Серант Д.Ф. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность: Учеб. Пособие. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2006. – 347 с.
4. Хоффман Е. Энерготехнологическое использование угля. - М.: «Энергоатомиздат», 1983. – 328 с.

Научный руководитель: Г.В. Ноздренко, д.т.н., профессор кафедры ТЭС Новосибирский государственный университет.

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ДВУХ КОТЛОВ К-50-14-250

Р.И. Горбатов

Новосибирский государственный технический университет

Котел К-50-14-250 Белгородского котельного завода номинальной производительностью 50 т/час с температурой перегретого пара 250 °С относится к котлам с естественной циркуляцией и выполнен по П-образной схеме. Котел имеет одиннадцать самостоятельных контуров циркуляции. Из них десять контуров циркуляции образуют экранные трубы и составляют радиационную часть поверхностей нагрева. Одиннадцатый контур самостоятельной циркуляции образует котельный пучок, в состав которого входит малый барабан с соответствующей разводкой труб. Одиннадцатый контур циркуляции чисто конвективный.

Перед проведением очистки поверхностей нагрева котлов они были обследованы на предмет наличия отложений. В результате обследования было выявлено:

- водяной объем барабана и поверхность, находящаяся на 500-600 мм выше погружного листа покрыта слоистыми отложениями толщиной 1-2 мм. Отложения твердые, при ударе молотка отскакивают и крошатся.
- поверхность барабана ниже погружного листа покрыта сплошным слоем отложений, прочно сцепленных с поверхностью металла.
- проходные сечения жалюзийного сепаратора практически полностью занесены отложениями, их очистка обязательна.
- сборный короб пара от циркуляционных контуров практически полностью покрыт отложениями толщиной 2 мм.
- пароперегреватель котла №2 в рабочем состоянии имеет большой перепад давления между барабаном и на выходе из пароперегревателя, достигающий 1,2-1,6 кгс/см<sup>2</sup>, что свидетельствует об отложении солей в трубах. Вырезанные образцы труб показали, что внутренние сечения занесены на 60% щелочными отложениями солей натрия.
- внутренние сечения экранных труб имеют отложения 6-8 мм толщиной.
- пароперегреватель котла №1 заменен по причине отглушки большого количества змеевиков в ходе эксплуатации котла из-за отложений солей в трубах и их перегрева.



Учитывая результаты обследования, было принято решение произвести щелочную выварку поверхностей нагрева котлов №1,2. Этот способ рекомендуется применять для котлов находящихся в эксплуатации. Он пригоден для удаления накипи любого состава и является малозатратным [2]. В качестве реагента применялся тринатрий фосфат ( $Na_3PO_4$ ). При щелочении под действием химических реагентов ослабляется сцепление между частицами отложений и они, растворяясь в котловой воде, выводятся из котла периодической продувкой. Для интенсивной очистки поверхностей нагрева необходима такая циркуляция котловой воды, которая может быть достигнута только при огневом обогреве поверхностей нагрева [1]. Большое значение в повышении эффективности щелочения котла играет также режим переменных давлений и температур. Резкое изменение температуры при щелочении способствует лучшему отделению накипи, окислы, ржавчины от поверхности металла, вследствие различных значений коэффициентов линейного расширения металла и состава отложений. Заполнение котла перед щелочением и подпитка в ходе щелочения производится химически очищенной водой [3]. График щелочения котла К-50-14 представлен на рис. 1.

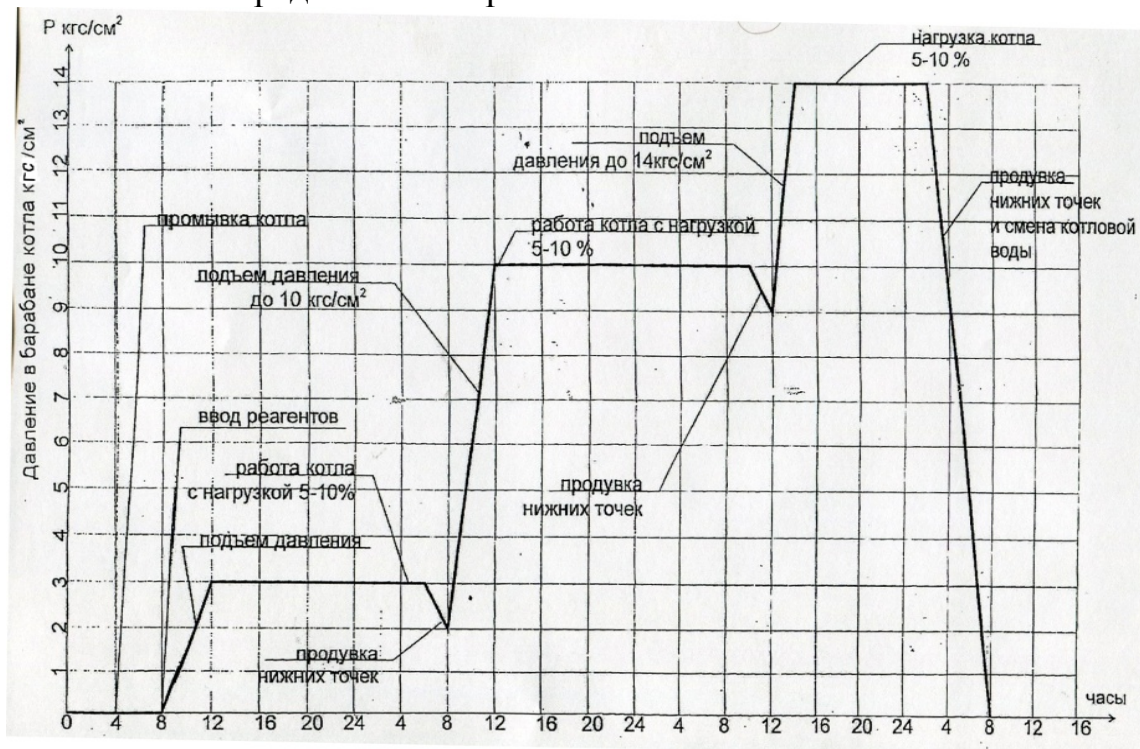


Рис.1. График щелочения котла К-50-14-250 ст.№1,2

В ходе проведения щелочения производился отбор проб из солевых и чистых отсеков барабана. По результатам анализов можно было наблюдать повышение щелочности, что свидетельствовало о растворении отложений на поверхностях нагрева (эксплуатационная

щелочность - 10 мг-экв/л, в процессе щелочения достигала - 150 мг-экв/л). Также при проведении периодических продувок часто наблюдалось забивание коллекторов солевых отсеков, это говорит о том, что отложения в больших количествах отставали от поверхностей нагрева экранных труб и оседали в этих коллекторах. Поэтому приходилось осуществлять продувку нижних точек обратным ходом - питательной водой.

После проведения очистки поверхностей нагрева и смены котловой воды были проведены вырезки доннышек нижних коллекторов. Коллектора были в хорошем состоянии – внутри не наблюдалось шлама и окалины.

О положительном результате проведения щелочения котлов можно судить по снижению температуры уходящих газов (до выварки составляла 200 °С, после – 130 °С), т.е. тепловосприятие поверхностей нагрева увеличилось. А также сопротивление участка между барабаном и на выходе из пароперегревателя снизилось до 0,4-0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

В результате проведенной работы удалось добиться выполнения поставленной задачи – обеспечить эксплуатационно-приемлемое состояние поверхностей нагрева.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Банник В.П., Винницкий Д.Я. Справочник монтажника тепловых и атомных электростанций – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 880 с., ил.
2. Иваненко А.С. Практическое пособие по очистке внутренних поверхностей нагрева паровых котлов, находящихся длительное время в эксплуатации – Киев: Техника, 1978 – 184 с.
3. Инструкция по щелочению паровых и водогрейных котлов
4. РД 34.37.408 – М.: ОРГРЭС, 1970

Научный руководитель: В.Н. Баранов, к.т.н., доцент НГТУ.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А.Е. Рыльский

Новосибирский государственный технический университет

«Когда скважина сухая, мы знаем цену воды»  
Benjamin Franklin in Poor Richard's Almanac (1746)

В современной энергетике в связи с возросшими требованиями по охране окружающей среды и рациональному использованию водных ресурсов применение традиционных систем охлаждения отработавшего пара в турбине (градирни, брызгательные бассейны) становится проблематичным. В качестве альтернативного варианта традиционным системам предлагается воздушный конденсатор (ВК).

Использование воздушной системы охлаждения позволяет сократить уровень экологической напряженности (за счет отсутствия насыщения атмосферного воздуха водяными парами), практически полностью исключить безвозвратное водопотребление, устранить образование отложений в виде накипи и биообразований в теплообменном оборудовании, а значит повысить его надежность. Применение ВК позволяет отказаться от водозаборных и очистных сооружений, градирен и других систем водоснабжения. Расположение электростанций с ВК не зависит от источника водоснабжения, что является огромным преимуществом.

Воздушный конденсатор находит все более широкое применение в США, Германии, Испании, Китае, Канаде и других странах, в то время как в энергетике нашей страны, перспективы использования данного вида конденсаторов даже не рассматриваются.

В связи с вышесказанным, разработка и исследование аспектов использования ВК на электростанциях весьма актуальная задача для России в целом и Сибирского региона в частности.

Двухступенчатый ВК фирмы GEA (ФРГ) (рис.1.1) состоит из А-образных модулей, последовательно включенных по паровой стороне [1]. Отработавший пар подается в трубы из расположенного сверху коллектора. Течение пара и конденсата в трубах – спутное, нисходящее. Тяга охлаждающего воздуха искусственная (преимущественно расположенные снизу нагнетательные вентиляторы).

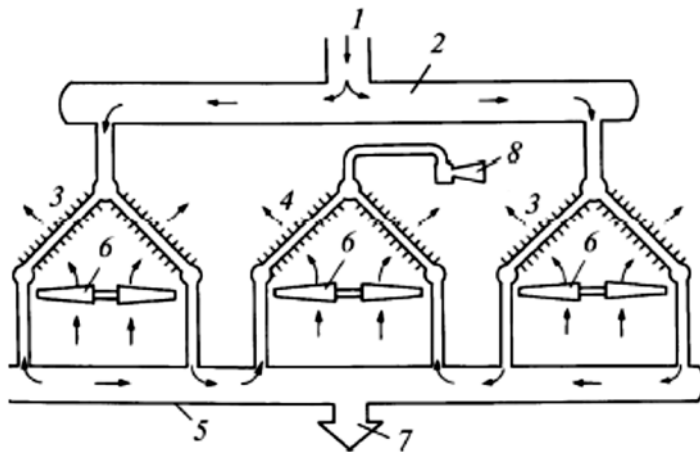


Рис. 1.1. Конструкция двухступенчатого воздушного конденсатора GEA: 1 – отработавший пар; 2 – парораспределительный коллектор; 3 – модули первой ступени конденсации; 4 – модули второй ступени конденсации; 5 – коллектор перепуске пара и отвода конденсата; 6 – нагнетательный вентилятор; 7 – отвод в конденсатосборник; 8 – эжектор.

В модулях первой ступени конденсация пара происходит на уровне 85% [1]. Несконденсировавшийся пар по нижнему коллектору движется в противоточные модули второй ступени, где поступая в трубы снизу, навстречу стекающему в нижний коллектор конденсату, тем самым подогревая его. Конденсат стекает из нижнего коллектора в конденсатосборник, а неконденсирующиеся газы отсасываются из верхней части второго модуля эжектором.

Другая конструкция двухступенчатого конденсатора (рис. 1.2) фирмы «С-Е Lummas» (США) [1]. Отличительной чертой являются горизонтальные U-образные, ребристые трубы. Каждый модуль включает в себя как первую, так и вторую ступени конденсации.

Отработавший пар из турбины подводится по расположенному снизу горизонтальному паропроводу, от которого ответвляются направленные вверх под некоторым углом к вертикали распределительные стояки. Из стояков пар поступает в трубы первой ступени конденсации, и из последних вместе с конденсатом в опускные трубы, присоединенные к горизонтальной сливной конденсатной линии. Пар из опускных труб первой ступени поступает в трубы второй ступени, имеющие свои опускные трубы, присоединенные к той же сливной конденсатной линии. Которая имеет подпорную петлю, обеспечивающую необходимый уровень воды в нижней части каждой опускной трубы, что исключает возможность разделение фаз в сливной трубе и образование в ней парового объема. Перемычки расположенные сверху второй ступени конденсации позволяют отсасывать неконденси-

рующиеся газы с помощью эжектора. Данный тип конденсаторов хорошо зарекомендовал себя в районах с низкими температурами наружного воздуха (до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [1], а также при переменных режимах работы.

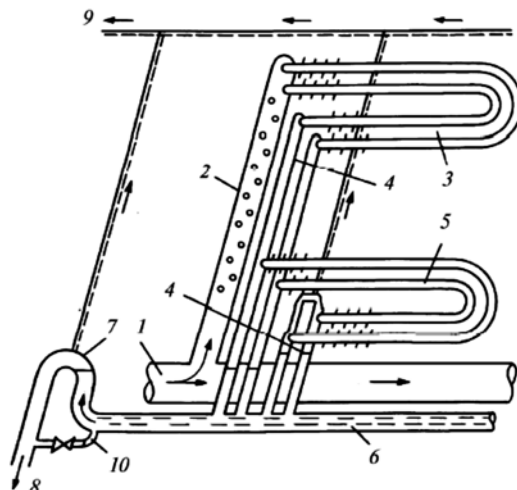


Рис. 1.2. Модуль двухступенчатого конденсатора фирмы «С-Е Lummas»: 1 – отработавший пар; 2 – парораспределительный коллектор; 3 – трубы первой ступени конденсации; 4 – опускные трубы; 5 – трубы второй ступени конденсации; 6 – конденсаторопровод; 7 – подпорная петля; 8 – трубопровод в конденсаторосборник; 9 – трубопровод к эжектору; 10 – байпас для опорожнения.

В настоящее время, разрабатываются:

- различные конструкции системы сухого охлаждения и ее компонентов,
- решения по эффективной компоновке пучков труб, материалу и геометрической форме их изготовления.

А также решаются задачи по автоматизации и надежной работе вентиляторов, подающих охлаждающий воздух.

По оценкам специалистов фирмы GEA (Германия) стоимость ВКУ составляет 80–100% стоимости обратного водоснабжения с поверхностным конденсатором, расходы электроэнергии на привод вентиляторов и циркуляционных насосов также приблизительно равны. Сравнительная оценка экономической эффективности применения ВКУ свидетельствует о значительном преимуществе использования воздушного конденсатора [1].

Таким образом, детальное исследование применения и анализ эффективности паротурбинного энергоблока с воздушным конденсатором в нашей стране, бесспорно важная и востребованная на практике задача.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Клевцов А.В., Пронин В.А. Перспективные технологии и энергоустановки для производства тепловой и электрической энергии. Применение воздушных конденсаторов в энергетике: МЭИ (ТУ) [[http://osi.ecopower.ru/2010-10-18-11-03-16/itemlist/category/115-64- применение воздушных конденсаторов в энергетике.html](http://osi.ecopower.ru/2010-10-18-11-03-16/itemlist/category/115-64-применение-воздушных-конденсаторов-в-энергетике.html)]

Научный руководитель: О.В. Боруш, к.т.н., доцент кафедры ТЭС НГТУ.

## 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТОПЛИВО

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.В. Пономаренко

Самарский государственный технический университет

**Плазменное напыление** является одним из наиболее интересных и эффективных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхность деталей. Оно представляет собой процесс, при котором наносимый материал в виде порошка или проволоки вводится в струю плазмы и нагревается в процессе движения с потоком газа до температур, превышающих температуру его плавления, и разгоняется в процессе нагрева до скоростей порядка нескольких сотен м/с. Плазменное напыление является одним из наиболее распространенных способов нанесения коррозионно-стойких и износостойких покрытий для работы в условиях эрозионного, фрикционного или абразивного износа.

В настоящее время в процессе генерации электроэнергии персоналу электрической станции приходится работать в условиях прогрессирующего старения основного энергетического оборудования, что является одной из главных причин снижения показателей надежности и энергоэффективности турбогенераторов.

Отказы при эксплуатации и преждевременный выход оборудования из строя во многом связаны с интенсивным износом конструкционных материалов различного оборудования (роторы, турбины, парогенераторы, теплообменники, запорная и регулирующая арматура, насосы и др.), от которого в итоге зависит эффективность и долговечность эксплуатации энергетических объектов.

Анализ опыта эксплуатации оборудования Самарской ТЭЦ позволяет сделать вывод, что практически все виды износа, характерные для энергетического оборудования, наиболее ярко проявляются в роторах турбогенераторов. Применительно к элементам ротора можно выделить следующие наиболее существенные виды износа: абразивная эрозия, кавитационная эрозия, различные виды коррозии, включая коррозионное растрескивание под напряжением и эрозионно-коррозионный износ [1].

К настоящему времени разработано достаточно много различных способов повышения износостойкости элементов ротора турбогенератора. Однако большая часть из них не учитывает системный характер износа данных элементов в результате взаимного влияния различных повреждающих факторов, что приводит к интенсификации процессов разрушения конструкционных материалов и увеличивает вероятность отказов оборудования.

В настоящее время к технологиям плазменного напыления предъявляются следующие требования применительно к условиям эксплуатации оборудования электрических станций:

- способ формирования покрытий не должен приводить к изменению структуры и механических свойств основного защищаемого металла, образованию в нем концентраторов напряжений, уменьшению усталостной прочности;
- покрытия должны обладать универсальными защитными свойствами, т.е. одновременно с высокой эрозионной стойкостью обеспечивать и повышение коррозионной стойкости;
- покрытия должны длительно сохранять свои свойства, не растрескиваться и не отслаиваться под действием напряжений эксплуатационного уровня, в том числе и при повышенной коррозионной активности рабочей среды;
- шероховатость поверхности после формирования покрытий не должна приводить к ухудшению газодинамических и трибологических характеристик.

В ходе проведенных нами исследований и испытаний в условиях Самарской ТЭЦ было установлено, что наиболее эффективными установками плазменного напыления являются те устройства, где применяется принцип электродугового розжига плазмы.

Предлагаемая нами установка плазменного напыления для проведения текущего ремонта и повышения энергоэффективности ротора турбогенератора основана на применении дугового плазмотрона с каналом переменного сечения. При наличии уступа в канале плазмотрона создаются особые условия для локализации области шунтирования дуги непосредственно за зоной рециркуляции газа. Это позволяет фиксировать длину дуги и реализовать режимы работы плазмотрона на восходящей вольт-амперной характеристике.

Преимущества применения данной установки заключаются в следующем: она позволяет поддерживать стабильные условия напыления и значительно снизить содержание оксидов серы, азота и т.д. в обрабатываемой поверхности. Кроме того, высокая энергия частиц на выходе плазмотрона обеспечивает абсолютно иные физические усло-



вия взаимодействия осаждаемых веществ с защищаемой поверхностью.

Также дуговые плазмотроны с каналом переменного сечения имеют определенные особенности при генерации турбулентности и формировании пленки напыления потоком плазмы [2]. Это, в свою очередь, дает практически неограниченный выбор металлов и сплавов для формирования покрытий, а также возможность формирования многослойных, многокомпонентных и нанокompозитных покрытий, обеспечивающих высокие показатели эрозионной и коррозионной стойкости в сочетании с высокой пластичностью и низким коэффициентом трения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Рыженков В.А., Федоров В.А. и др. Повышение коррозионной стойкости лопаток высокотемпературных ступеней турбин //Надежность и безопасность энергетики. 2009.№2 (5). С. 34-39.
2. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. - Т. 17. - Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. - 712 с.

Научный руководитель: В.Н. Цапенко, к.т.н., доцент кафедры ТОО Самарский государственный технический университет.

### **РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ**

С.А. Хаустов

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ПГС и ПГУ

Топливо дорожает с каждым годом, поэтому при проектировании и комплектации котельной техники энергосберегающие аспекты, неразрывно связанные с параметрами энергоэффективности базового оборудования, приобретают все большее значение.

Энергоэффективность – достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды.

Фундаментальный показатель энергоэффективности котла – коэффициент полезного действия (КПД). Чем выше КПД котлоагрегата, тем меньше потери тепла и тем меньше необходимо сжечь топлива для обогрева одной единицы полезного объема. Коэффициент полезного действия жаротрубных котлов малой мощности при сжигании газа, как правило, достигает 90-95%, при этом они обладают лучшей ремонтпригодностью, полностью автоматизируемы и стоят значительно дешевле своих водотрубных аналогов. По этой причине системы автономного теплоснабжения на базе таких котлов в настоящее время находят широкое применение.

Однако котел не только производит энергию, но и потребляет ее на собственные нужды. В основном это электрическая энергия, которая расходуется на приводы насосов, механизмов топливоподачи и т.п. В большинстве случаев понижение теплотерь в котлоагрегате приводит к повышению его энергопотребления и/или стоимости. Для повышения энергоэффективности котла следует найти оптимальное соотношение полезной мощности и энергозатрат на собственные нужды. Кроме того, следует избегать излишней металлоемкости и чрезмерной сложности необходимых эксплуатационных работ.

Для решения этой оптимизационной задачи на кафедре ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ разработан аппаратно-программный комплекс, который позволяет производить необходимую оптимизацию технико-экономических показателей по результатам теплового, аэродинамического и гидравлического расчетов жаротрубных котлов. Продукт состоит из: расчетного модуля, модуля численного моделирования и модуля визуализации.

Для реализации расчетного модуля программного продукта была разработана собственная методика, т.к. практика конструирования жаротрубных котлов до сих пор не имеет четкой нормативно-расчетной базы. Расчеты жаротрубных котлов малой мощности по нормативному методу дают недопустимо большую погрешность, поскольку метод разрабатывался для расчетов крупных (энергетических) котельных агрегатов и базируется на задании ряда эмпирических поправок, наработанных только для соответствующих типов котлов.

Путем численного моделирования получена подробная картина параметров топочной среды жаротрубных котлов в широком диапазоне конструктивных характеристик: определены расчётные поля средних скоростей, температур и концентраций компонентов, определены структура факела и положение максимума тепловыделения. Численным методом получены аэродинамические и тепловые характеристики жаровых труб котлов, а также изучено влияние конструк-

ции на положение ядра факела и коэффициент аэродинамического сопротивления жаровой трубы. Достоверность полученных результатов подтверждена натурными испытаниями [1].

На основе полученные данные произведены уточнения эмпирических коэффициентов и зависимостей. Таким образом, реализованная в программе методика не противоречит нормативным методам, а лишь только расширяет и уточняет их применительно к жаротрубным котлам [2].

В настоящее время ввиду отсутствия единой инженерной методики расчета для решения комплексных задач конструирования жаротрубных котлов признанным эффективным инструментом является численное моделирование с использованием пакетов прикладных программ, работа с которыми требует высокой квалификации инженерного персонала как в области вычислительной техники, так и в области фундаментальных наук. Такие программные продукты используют метод конечных элементов, который требует значительного количества времени для проведения расчетов. Что делает их неприменимыми для решения поставленных оптимизационных задач, требующих перебора и обсчета всевозможных вариантов конструктивных схем в реальном времени.

Таким образом, безусловным преимуществом разработанного программного продукта перед известными апробированными пакетами численного моделирования является скорость расчетов. Решение балансовых уравнений расчетным модулем выполняется методами последовательных приближений и бинарного поиска, балансы за доли секунды сводятся с расчетной невязкой менее 0,01%.

На основе расчетных данных можно дать оценку экономичности и эффективности рассматриваемой конструкции, а также выработать предложения по её усовершенствованию.

Программный продукт дополнен модулем визуализации технических элементов средствами 3D-графики [3]. С его помощью появляется возможность виртуального прототипирования разработанных устройств. Трехмерное изображение смоделированного рабочего цикла котла позволит пользователю глубже вникнуть в детали отображаемых процессов, благодаря чему, программный комплекс может быть использован в качестве тренажеров наладки и эксплуатации проектируемых котлоагрегатов.

Кроме того разработанная программа может стать полезным инструментом для проведения расчетов с целью повышения энергоэффективности существующих котлов, а также при разработке новых энергоэффективных жаротрубных котлоагрегатов.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Хаустов С. А. , Заворин А. С. , Фисенко Р. Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 322 - №. 4. - С. 43-47
2. Хаустов С. А. , Заворин А. С. Повышение эффективности работы современных жаротрубных котлов малой мощности // Пути совершенствования работы теплоэнергетических установок: материалы Всероссийской молодежной конференции , Владивосток, 28-29 Мая 2012. - Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012 - С. 268-270
3. Хаустов С. А. Инновационные технологии в образовательном процессе. Применение трехмерной визуализации в подготовке студентов по специальности "Котло- и реакторостроение" // Инновационные технологии в образовательном процессе» (или «Технологии электронного обучения в образовательном процессе»): сборник научных работ Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов, Белгород, 1 Ноября 2012. - Белгород: Изд-во БелГУ, 2011 - Т. 3 - С. 10-14

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

## **ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛУВАГОНА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ УВЛАЖНЕННЫХ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

М.Г. Подвицкий, В.А. Соловьев

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Ежегодно с наступлением первых сильных морозов начинаются проблемы с разгрузкой смёрзшегося угля, перевозимого в полувагонах. На этих операциях зачастую используют людей с ручным инструментом, грейферы и другую технику. При этом производительность труда невысока, повреждаются вагоны, очень велика вероятность производственного травматизма. В ожидании выгрузки простаивают тысячи вагонов, в которых уголь уже смерзся до монолитного состояния. По данным ОАО «РЖД», из-за подобных методов выгруз-

ки в портах ежегодно количество выведенных из строя вагонов исчисляется тысячами. Зная эти данные, можно прийти к выводу о необходимости разработки нового способа выгрузки смерзшегося угля.

Для ослабления влияния вышеотмеченных недостатков и уменьшения времени выгрузки сыпучих грузов была проведена разработка системы, позволяющей избежать смерзания, чтобы избавиться от необходимости использования различных процедур предварительной подготовки. Система представляет собой мобильное вагоноразмораживающее устройство для каждого полувагона в подвижном составе. Её структурная схема приведена на рис. 1.

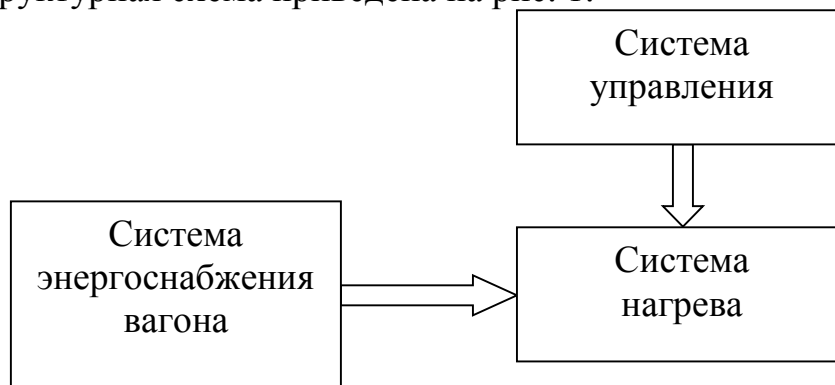


Рис. 1. Структурная схема

Обязательной частью системы поддержания температуры в полувагоне при его транспортировке будем считать устройство, обеспечивающее подачу мощности, необходимой для её эффективного функционирования. Источником электроэнергии служит подвагонный генератор, который приводится во вращение от оси колесной пары вагона с помощью специального привода.

Перед началом расчета нетрадиционной системы подогрева вагона была проведена оценка затрат энергии.

Для этого учитывались две составляющие: энергия, необходимая для нагрева металлических стенок и днища полувагона и прилегающего слоя угля от исходной температуры до  $5^{\circ}\text{C}$ , и энергии на поддержание достигнутой температуры в течение времени, затрачиваемого на доставку полувагонов с углем до станции, на которой будет происходить разгрузка. Из полученных данных следовало, что зависимость количества тепла от температуры и скорости можно считать близкой к линейной как для состава, находящегося в движении, так и для находящегося на остановке. Также можно сделать вывод, что при нанесении дополнительного изолирующего покрытия необходимая мощность значительно снижается.

В основу нетрадиционной системы поддержания температуры положим нагревательный элемент трансформаторного типа (НЭТ), в которых индуктор, как в силовых трансформаторах, состоит из магнитопровода и первичной обмотки. Особенностью конструкции таких элементов является вторичная обмотка, выполненная в виде короткозамкнутого витка, основная доля тепла выделяется во вторичной обмотке. Такое техническое решение позволяет получить более безопасный в эксплуатации нагревательный элемент с большим сроком службы [1, 2, 3, 4]. Выбрав в качестве нагревающей вторичной обмотки алюминиевую конструкцию, укладываемую в места рифления стенок полувагона, был произведен расчет всех параметров НЭТ[5].

Для размещения вторичных кольцевых короткозамкнутых обмоток выберем вариант, приведенный на рис. 2.

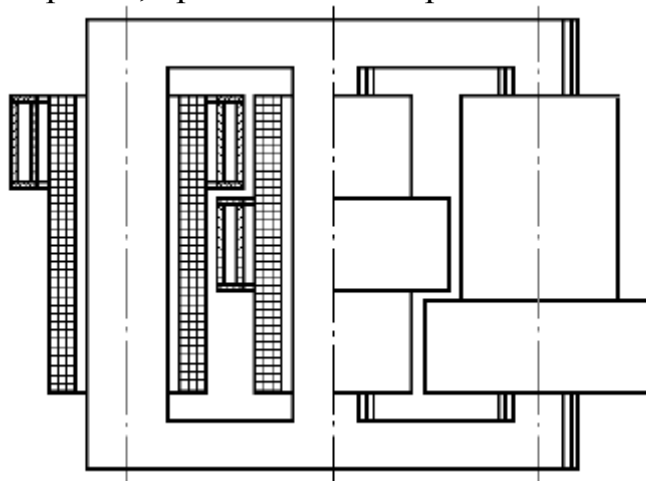


Рис. 2. Вариант размещения кольцевых короткозамкнутых обмоток

Исследование влияния НЭТ на поддержание температуры в полувагоне показало, что на время, необходимое для нагрева, в значительно большей степени влияет исходная наружная температура воздуха, чем скорость движения состава (она же – скорость ветра). Результаты расчетов приведены на рис. 3.

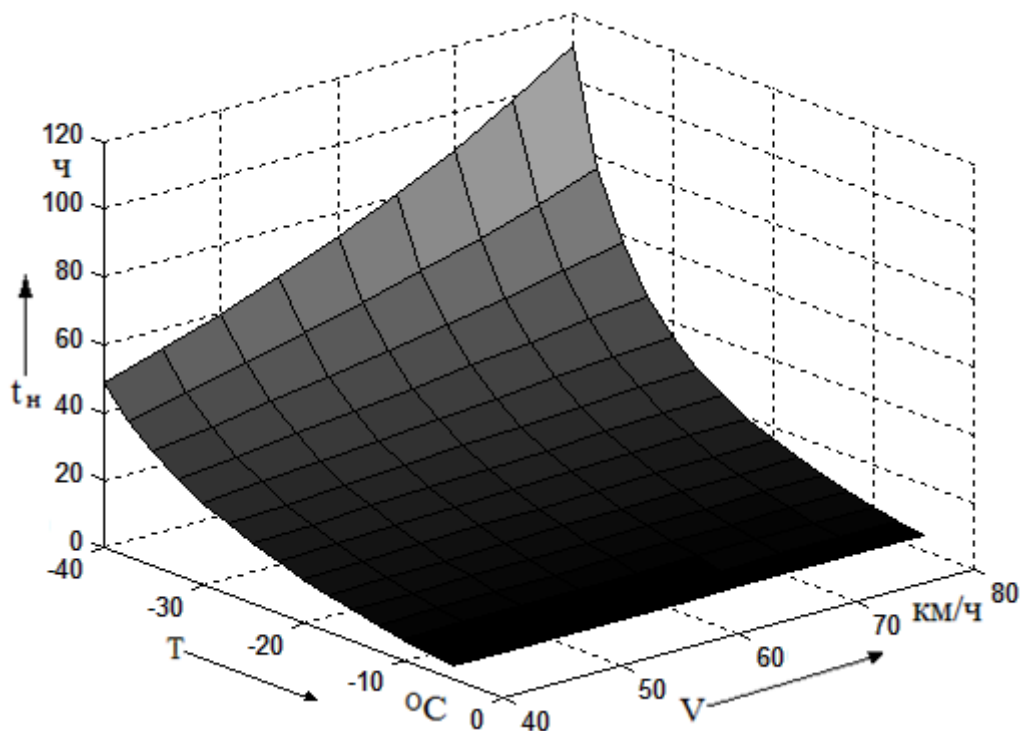


Рис. 3. Диаграмма, описывающая время, необходимое для нагрева полувагона в движении

Полученные в ходе работы результаты позволяют в дальнейшем доработать полученную систему выгрузки угля, обеспечив более точный расчет времени, необходимого на разрушение льда.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Сериков, А. В. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем энергообеспечения: дис. ... докт. техн. наук.: защищена 27.12.12 : утв. 24.06.02 / Сериков Александр Владимирович. – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 375 с.
2. Кузьмин, В. М. Разработка и исследование трансформаторов для установок электроводонагрева / В. М. Кузьмин, А. В. Сериков // Электротехника. – М.: ЗАО «Знак». – 2001. – № 7. – С. 45-51.
3. Сериков, А. В. Тепловой расчет электрорадиатора трансформаторного типа / А. В. Сериков, Т. В. Герасименко // Электротехника. – М.: ЗАО «Знак». – 2011. – №7. – С.33-39.
4. Сериков, А. В. Особенности проектирования трехфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой для установок электронагрева / А. В. Сериков, В. М. Кузьмин, М. М. Борисенко // Вестник УГТУ-УПИ «Электромеха-

нические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2003. – №5. – С. 223-226.

5. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Научный руководитель: В.А. Соловьев д.т.н., заведующий кафедрой ЭПАПУ Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет.

## **ВАРИАНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОГО ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЭС**

И.П. Каменев, Е.Г. Карпов

Новосибирский государственный технический университет

Все отечественные угольные ТЭС сталкиваются и борются с пылением угольного топлива на всех этапах его использования. Наиболее распространённым способом снижения запылённости помещений является аспирация, однако эффективность её далека от предельно возможной из-за низкого качества очистки запылённого воздуха, который с большим содержанием угольной пыли выбрасывается в атмосферу.

При возобновлении строительства Экибастузской ГРЭС-2 с установкой оборудования энергоблока ст. №3 мощностью от 500 до 630 МВт, в корректируемом проекте рассматривается возможность и целесообразность сжигания в котле уловленной системами аспирации угольной пыли, переработанной в кавитационное водоугольное топливо (КаВУТ).

Обычная схема аспирации – возврат уловленного на ленту конвейера - увеличивает проблемы эксплуатации топливоподачи, а вариант сбора угольной пыли с организацией пневмотранспорта со всех узлов топливоподачи до топки котла громоздок и опасен.

Но если у каждой группы аспирационных установок организовать узел приготовления водоугольного топлива по кавитационной технологии, состоящий из 3-х небольших ёмкостей, питателя, кавитатора и перекачивающего насоса (Рис. 1), то проблемы хранения этого топлива и способа его доставки к месту потребления просто нет.

Проблема же сжигания КаВУТ решена путём сжигания его в кипящем слое инертного материала. Этот способ известен, в наших



разработках применена его двухступенчатая модификация, позволяющая:

- регулировать температуру кипящего слоя;
- увеличить более чем в два раза удельную теплопроизводительность площади кипящего слоя (до 5 Гкал/м<sup>2</sup>).

На огневом стенде ФГУП «Гидротрубопровод» в г. Раменское были проведены эксперименты по совместному сжиганию КаВУТ из угольной пыли и отходов углеобогащения.

Эксперимент позволил конкретизировать технические параметры системы сжигания КаВУТ в угольном котле большой мощности. Котёл для этого предполагается дооснастить выносными предтопками кипящего слоя (Рис.2).

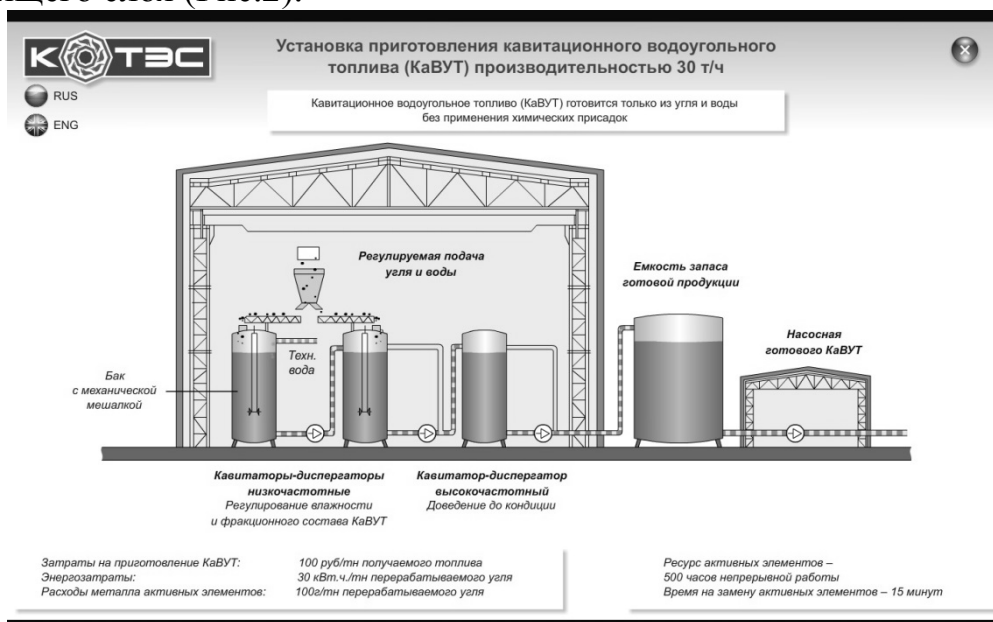


Рис. 1. Схема узла приготовления КаВУТ

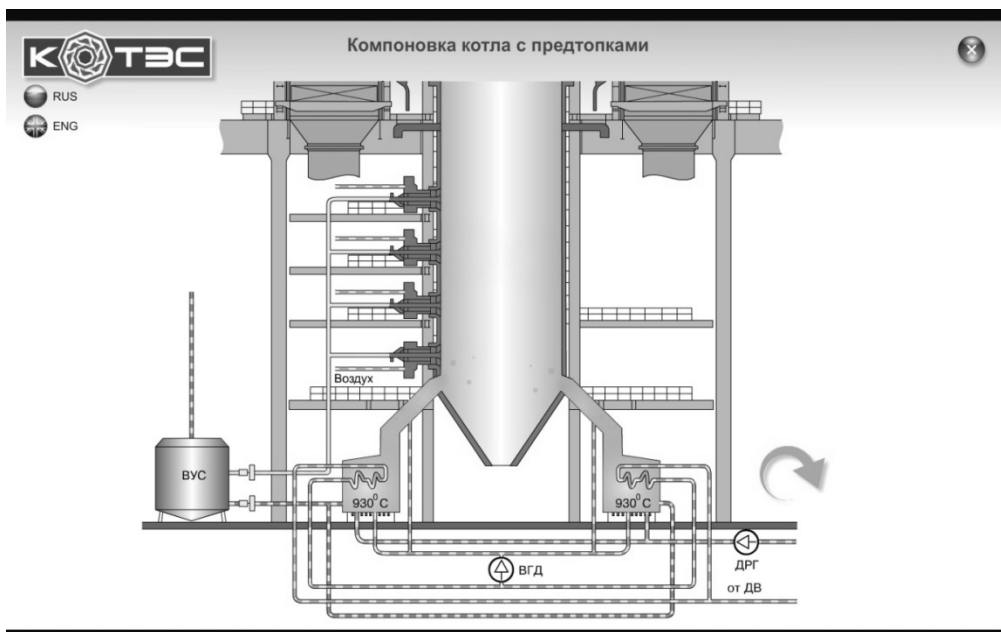


Рис. 2. Компоновка котла с предтопками

Мощность таких горелочных устройств определяется количествами сжигаемого топлива. Отработаны конструкции предтопок в диапазоне производительности от 0,5 до 30 Гкал/час. Предварительные расчёты экономической эффективности показали, что предлагаемая технология сжигания уловленной угольной пыли окупается за 2-3 года. К.П.Д. электростанции (4 энергоблока по 500 МВт) увеличится почти на 0,1%.

Но проведенная серия огневых экспериментов выявила ещё ряд положительных сторон использования КаВУТ, об одной из которых можно говорить уже сейчас:

Оптимальная температура в топках котлов выбирается с учётом теплофизических характеристик конкретного угля с целью обеспечения стабильного горения в широком диапазоне производительности котла при минимальном удельном объёме топки и предельной полноты выгорания топлива. В камерных топках при факельном сжигании угольной пыли эта температура находится в диапазоне:

- при сжигании бурых углей: 900 – 1100 °С;
- при сжигании каменных углей: 1150 – 1300 °С.

Указанные температуры находятся очень близко к температурам размягчения минеральной части соответствующих углей и эта близость проявляется в шлаковании трубных поверхностей топок котлов.

Предлагаемый комбинированный способ сжигания угля с использованием водоугольного топлива на первом этапе и угольной пыли на втором позволяет обеспечить стабильную работу топки в широком диапазоне нагрузок при поддержании температур в зоне воспла-

менения и дожигания топлива существенно ниже температур размягчения минеральной части топлива. Для каменных углей, в том числе марок «Д», «СС» и антрацита эта температура находится в пределах 950 – 1150 °С при температурах размягчения золы - 1250 – 1350 °С.

Водоугольное топливо при этом подаётся в кипящий слой предтопка, где воспламеняется и частично сгорает при недостатке кислорода, что обеспечивается регулированием соотношения количеств воздуха и дымовых газов, подаваемых под слой с поддержанием температуры в слое в диапазоне 920 – 970 °С.

На втором этапе, за счёт подачи вторичного воздуха и дожигания топлива, поступающего из предтопка в топочное пространство, температура факела возрастает до 1050 – 1100 °С. Горящими продуктами факела из предтопка легко поджигается угольная пыль, поступающая в топку котла через основные горелки. «Легко» - имеется в виду при достаточно низкой температуре – 1100 °С и дальнейшее течение процесса регулируется при температуре не выше 1150°С. При незначительных объемах реконструкции действующих котлов, что очень важно для их владельцев, обеспечивается возможность:

1. Использования отходов углеобогащения (шламов, кеков, отсеков), перерабатывая их перед сжиганием в КаВУТ;
2. Совместного сжигания в топках котлов каменных и бурых углей;
3. Эффективного сжигания в котлах уловленной системами аспирации угольной пыли, осадка гидросмыва, а также, при желании бороться с пылением и ветроуносом на угольных складах, отсортированной угольной мелочи также переработанных в КаВУТ;
4. Исключения подсветки факела пылеугольных горелок мазутом или газом, при расширении диапазона устойчивого горения;
5. Проработать вариант безмазутной растопки угольных котлов;
6. Доведения уровня образования и выбросов оксидов азота до нормативного без каких-либо дополнительных специальных мер;
7. Существенного снижения шлакования трубных поверхностей топок котлов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Карпов Е.Г., Парубец А.А. // Отчетные материалы по проведению стендовых огневых испытаний двухступенчатого сжи-

гания водоугольного топлива с газификацией в низкотемпературном кипящем слое в комбинации с факельным сжиганием с целью последующего использования технологии на энергетических и водогрейных котлах. – Новосибирск, 2012. – 54 с..

Научный руководитель: П.А. Щинников, д.т.н., профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций Новосибирский государственный технический университет.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БУРЫХ УГЛЕЙ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

А.Н.Кучерина, А.С. Дьяченко\*, А.Ю.Долгих  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ПГС и ПГУ, гр. 5БМ2Д, \*гр. 6481

В настоящее время наряду с эффективным использованием топлив для получения энергии все острее ставится вопрос о проведении этого процесса с наименьшим воздействием на окружающую среду. Ужесточение экологических требований ставит под сомнение использование “грязных” топлив как бурый уголь. Согласно[1] есть возможность термической переработки угля с целью получения более экологически чистого продукта полукокса.

В данной работе для получения полукокса использовалась экспериментальная установка представленная на рисунке 1. Основными элементами которой являются бомба 1, холодильник 2 и смолосъемник 3.

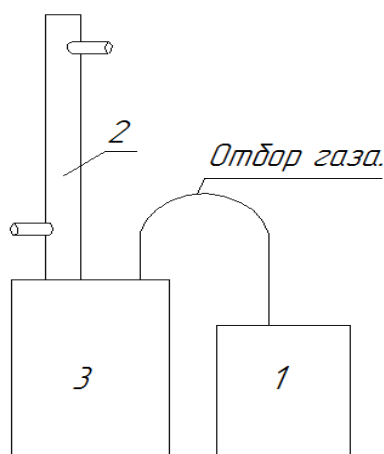


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На предыдущем этапе были получены предварительные результаты термической переработки исследуемого угля в виде состава неконденсирующихся газов и материального баланса представленные в таблицах 1 и 2 [2].

Таблица 1. Состав неконденсирующихся газов

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Теплота сгорания смеси, МДж/м <sup>3</sup>
12,0	1,23	0,35	13,13	42,9	14,5	11,98	3,1	9,3

Таблица 2. Материальный баланс

Статьи баланса	Количество продуктов	
	гр	%
<b>Поступило</b>		
Исходный уголь	224,56	70,75
Влага	92,84	29,25
<b>Всего</b>	<b>317,4</b>	<b>100</b>
<b>Получено</b>		
Полукоккс	134,2	42,28
Смола	9,17	2,89
Пирогенетическая влага	18,65	5,88
Газ	148,9	46,91
Потери	6,48	2,04
<b>Всего</b>	<b>317,4</b>	<b>100</b>

На данном этапе была проведена серия экспериментов различных температурных режимов (450<sup>0</sup>С, 500<sup>0</sup>С, 550<sup>0</sup>С, 600<sup>0</sup>С.) и различной крупности (6 мм, 10 мм, 12 мм.) для получения оптимальных параметров зольности полукоккса, выхода летучих неконденсирующихся газов, теплоты сгорания полукоккса.

Таблица 3. Выход продуктов термического разложения

Крупность. (мм.)	Тем-ра. °С	Время опыта (мин)	Масса полукоккса. (г.)	Масса смолы (г.)	Масса воды. (г)	Выход газов (г.)
6	450	60	81,2	4,1	4,8	9,9
6	500	60	74,9	6,8	7,8	10,5
6	550	60	70,9	8,2	9,7	11,2
6	600	60	67,2	9,2	10,1	13,5
10	450	60	80,5	4,2	7,9	7,4
10	500	60	76,7	5,2	8,4	9,7
10	550	60	72,2	6,4	9,4	12

10	600	60	66	8,2	11,4	14,4
12	450	60	80,2	4,9	5,5	9,4
12	500	60	76,5	5,1	6,6	11,8
12	550	60	65,7	7,4	12,5	14,4
12	600	60	60,9	8,9	13,2	17

Таблица 4. Зольность полукокса

Крупность. (мм.)	Зольность полукокса аналитической пробы %	Крупность. (мм.)	Зольность полукокса аналитической пробы %	Крупность. (мм.)	Зольность полукокса аналитической пробы %
6	15,47	10	23,65	12	13,78
6	14,99	10	19,49	12	13,28
6	11,71	10	15,36	12	14,06
6	12,79	10	15,68	12	15,56
6	20,04	10	16,61	12	16,94
6	16,74	10	16,28	12	16,2
6	16,57	10	14,71	12	17,04
6	17,33	10	13,88	12	17,04

Таблица 5. Выход летучих неконденсирующихся газов

Крупность. (мм.)	Выход летучих веществ в аналитической пробе %	Крупность. (мм.)	Выход летучих веществ в аналитической пробе %	Крупность. (мм.)	Выход летучих веществ в аналитической пробе %
6	28,61	10	26,96	12	29,82
6	30,10	10	27,37	12	29,47
6	23,23	10	22,25	12	20,51
6	25,34	10	22,06	12	20,94
6	19,51	10	21,39	12	19,004
6	19,53	10	20,77	12	18,92
6	17,14	10	14,78	12	16,99
6	16,79	10	16,56	12	16,88

По результатам выявилось, что у проб с крупностью 6 мм при различных температурных режимах масса полукокса и выход смол немного выше чем у остальных проб. Так же самые низкие показатели по выходу воды и газов при термической переработке.

По результатам выявилось, что у проб крупностью 6 мм при различных температурных режимах самые низкие показатели зольности полукокса.

Так же самые высокие показатели по выходу летучих неконденсирующихся газов, с ростом температуры режима этот параметр понижается. Его максимальное значение зафиксировано при температурном режиме 400<sup>0</sup>С ( $V^a=30,10\%$ ).

Так же самый высокий показатель по теплоте сгорания полукокса при температурном режиме 600<sup>0</sup>С ( $Q_{\text{низ}}=26319,937$  Дж\г). С ростом температуры режима этот параметр повышается.

Оптимальная крупность для получения высоких показателей полукокса и 6 мм.

Таблица 6. Теплота сгорания полукокса

Крупность. (мм.)	Температура °С	Низшая теплота сгорания $Q_{\text{низ}}$ . Дж\г.
6	450	23503,725
	500	24819,062
	550	26203,822
	600	26319,937
10	450	23675,211
	500	24815,232
	550	25345,522
	600	26011,873
12	450	23408,245
	500	24540,325
	550	24821,522
	600	25621,051

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Федосеев С. Д. Полукоксование и газификация твердого топлива : учебник / С. Д. Федосеев, А. Б. Чернышев. — М. :Гостоптехиздат, 1960. — 326 с.
2. Дьяченко А.С., Кучерина А. Н. Перспективы термической переработки бурых углей Шивэ-Овооского месторождения Монголии

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, старший преподаватель кафедры ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

## КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУРЫХ УГЛЕЙ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

А.Н. Кучерина, А.С. Дьяченко\*, А.Ю. Долгих  
Томский политехнический университет,  
ЭНИН, ПГС и ПГУ, гр. 5БМ2Д, \*гр. 6481

### Вводная часть

Большие запасы, благоприятные горно-геологические условия залегания, позволяющие осуществлять добычу наиболее экономичным путем и уникальность физико-химических и технологических свойств ставят бурые угли на видное место в качестве топлива и технологического сырья. При увеличении доли угля для получения тепловой энергии при сжигании его на станциях ТЭЦ, также будут значительно возрастать выбросы золошлаковых отходов что отрицательно повлияет на окружающую среду.

Чтобы эффективно использовать уголь необходимо вводить технологию комплексной переработки с получением различных продуктов, состоящей из трёх основных направлений: сжигание, утилизация и переработка.

### Теоретическая часть

Бурый уголь является специфическим сырьем и ему присущ ряд особенностей таких, как высокая реакционная способность, низкое содержание негорючей части, высокую влажность и гигроскопичность и как следствие заниженную теплоту сгорания. Эти и другие свойства бурых углей являются определяющими в вопросе об эффективном комплексном использовании данного топлива.

### Характеристики бурых углей Шивэ-Овооского месторождения

Данные угли характеризуются как слабо окисленные, имеют среднее значение в атомном соотношении Н:С (определяется по выходу летучих) [1]. Это соотношение определяет средние выходы жидких продуктов при термическом разложении. Также имеется высокий выход гуминовых кислот, с ростом выхода летучих у слабо окисленных углей этот показатель снижается [1]. Также они являются низкосернистыми, являются средне калорийным топливом и относятся к углям марки ЗБ [3]. В класс ЗБ входят угли, переходные от бурых к длиннопламенным [1].

Характеристики углей Шивэ-Овооского месторождения: влажность ( $W^r$ ) – 28%, зольность ( $A^d$ ) – 12 %, Выход летучих ( $V^{daf}$ ) – 50 %, теплота сгорания ( $Q_i^r$ ) – 15 МДж/кг. Элементарный состав: С<sup>r</sup>- 59 %,



H<sup>r</sup>–1,5 %, N<sup>r</sup>–0,6 %, S<sup>r</sup>–0,4 %, O<sup>r</sup>– 38,5 %. Химический состав золы: SiO<sub>2</sub>– 41 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 17 %, CaO – 16 %, MgO - 6 %, SiO<sub>3</sub> - 12 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 4 %, Na<sub>2</sub>O - 0,5 %, K<sub>2</sub>O - 0,08 %.

### **Сжигание**

Существуют три основных направления сжигания твердого топлива: слоевое, камерное и циркулирующий кипящий слой.

Слоеое подразделяется на сжигание в плотном слое и сжигание в кипящем слое. Для первого случая благоприятно использовать слабоспекающиеся угли [2]. Одна из самых ранних технологий сейчас наименее распространена и практически не развивается. Сжигание в кипящем слое имеет широкое применение и активно развивается, а также имеет ряд достоинств. К плюсам можно отнести упрощение схемы подготовки твердого топлива, отсутствие пылеприготовления, малый выход токсичных веществ, содержащих соединения серы и азота. К недостаткам относятся недожог с уносом частичек угля с золой и относительно крупный размер золы (до 10 мм).

Камерное сжигание также разделяется на два направления: факельное и вихревое. В камерных топках можно сжигать практически любой уголь. Присутствует система пылеприготовления и подсушки. Пылевидное сжигание требует большие объемы топлива, поступающего в топку, для обеспечения полноты сгорания. Вихревое сжигание характеризуется более устойчивым воспламенением чем факельное, но такие топки работают с большими тепловыми напряжениями [2].

Существует метод объединяющий камерное и слоевые способы сжигания твердого топлива - циркулирующий кипящий слой.

Исходя из характеристик угля, предлагается сжигать его в камерных топках. Это связано с возможностью эффективно сжигать топлива различной степени теплоты сгорания, при относительно средней теплоте сгорания исследуемого угля. В приемлемых размерах топки процесс сгорания топлива происходит при достаточно высоких скоростях. Также есть возможность подсушивать топливо, тем самым понижать влагосодержание, что является весомым фактором при использовании сырья с высоким содержанием влаги коим и является исследуемое топливо. Низкая прочность сопутствует простому процессу пылеприготовления. Малое содержание азота и серы соответствует относительно низким выбросам вредных веществ.

### **Переработка**

Существуют различные способы переработки углей, к ним относятся термические, химические и термохимические.

Газификация и коксование наиболее распространённые процессы термической переработки твердого топлива. Рассмотрим про-

дукты коксования в различных температурных диапазонах: 500-550°С (полукокс), 700-850°С (среднетемпературный кокс), 900- 1050°С (кокс). В результате низкотемпературного разложения получают полукокс, первичную смолу и первичный газ. Состав смолы: воски (битумы), олефины, фенолы, нафтены, ароматические углеводороды и основания. Выход смолы 3-30%. Первичный газ характеризуется высоким содержанием метана и непредельных углеводородов и наличием водорода. Среднетемпературный кокс обладает большей прочностью. Выход летучих 7-10%. Сопоставим по реакционной способности с полукоксом. Смола содержит большое количество фенолов и легкокипящих. Основной целью высокотемпературного разложения является получение твердого кокса с высокой прочностью и крупностью и другими свойствами металлургического топлива. Процесс сопровождается выделением калорийного газа [2].

Газификация является источником получения горючих газов путем термического воздействия на твердое топливо в присутствии воздуха, водяного пара, технического кислорода и других газов. При применении этой технологии предпочтительно использование сернистых и многозольных углей. Это связано с трудностью очистки дымовых газов от золы и серы на электростанциях. Продуктами газификации являются энергетические, технологические, а также высококалорийные газы [1].

Одним из способов химической переработки бурых углей является экстракция их органическими растворителями с целью получения битума, воска, парафинов, масел и асфальтенов. Качество получаемых продуктов зависит от влажности и крупности используемого материала [1].

В промышленном из бурого угля производятся углещелочные реагенты, используемые как понизители вязкости и стабилизаторы глинистых растворов при бурении скважин. Определяющей характеристикой процесса является выход гуминовых кислот, которые переводятся в водородосодержащие соединения путем обработки сырья раствором каустической соды.

При термическом разложении выгоднее получать полукокс. Нецелесообразно проводить средне и высокотемпературное разложение так как, низкая спекаемость и прочность дадут низкопрочный кокс. Также из-за средней калорийности угля получится низкокалорийный газ. В отличие от коксования при низкотемпературном разложении вместо калорийного газа можно получить газовый бензин, схожий по составу с бензином из нефти. Альтернативой термическому разложению может быть переработка с получением углещелочных реагентов.

Этому соответствует высокий выход гуминовых кислот, что связано с выходом летучих.

#### **Утилизация**

Простой и доступный вариант утилизации золы и шлаков от сжигания углей является использование их в различных строительных областях, так как золошлаковые материалы по химическому составу близки к природному минеральному сырью, используемому для производства строительных материалов и изделий. Зола-унос по технологическим характеристикам является наиболее перспективным техногенным сырьём. Однако зола и шлак должны соответствовать техническим требованиям предъявляемым изделиям изготовленным из них.

Исходя из свойств и минерального состава золы и шлака, оптимальным вариантом утилизации является производство наполнителей для мастик. Этому соответствуют легко достижимые технические условия. Другим вариантом будет применение в качестве частичной добавки или в инертном виде в производстве бетонов, цементов, гравия, кирпича и других строительных материалов.

#### **Заключение**

Исходя из характеристик и свойств бурых углей, исследуемое топливо предпочтительней сжигать в камерных топках. Альтернативой является получение полукокса и ряда побочных продуктов термического разложения угля. Есть возможность переработки полученных золошлаковых отходов в наполнители для мастик.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Святец И.Е. Агроскин А.А. Бурые угли как технологическое сырьё: – М: Недра, 1976. – 223 с.
2. Каталымов А.В. Кобяков А.И. Переработка твердого топлива: учебное пособие для вузов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой. 2003. – 248 с.
3. Левицкая О.В. Теплотехнический и элементный анализ угля Шивэ – овооского месторождения Монголии: ТПУ, ЭНИН, ПГС и ПГУ, 6472.
4. ГОСТ 2889-80 Мастика битумная кровельная горячая. Технические условия.

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, старший преподаватель кафедры ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

# ВЛИЯНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОБДУВА НАГРЕТЫМ ВОЗДУХОМ НА ПРОЦЕСС ВЫГОРАНИЯ УГОЛЬНЫХ КОКСОВ

С.И. Гордеев, С.Д. Нестеров

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Процесс горения твердых топлив при многообразии происходящих при этом явлений возможно разделить на две характерные стадии из-за наличия нестойкой летучей части и кокса. При внесении кусочка топлива в нагретое пространство (топку) происходит сушка топлива, и разложение его летучей части; которая воспламеняется спустя некоторое время, и окутывает его ярко светящимся пламенем, температура, измеряемая в центре кусочка, не превышает  $600-700^{\circ}\text{C}$  [1]. Момент окончания выхода летучих характеризует конец первой стадии, называемой периодом подготовки топлива к горению, его длительность зависит от интенсивности теплообмена между кусочком и окружающим пространством, размера кусочка и затрат тепла на нагрев кусочка: на испарение влаги и разложение части топлива. Оставшаяся часть кусочка представляет собой коксовый остаток.

Вторая стадия процесса - догорание кокса (твердого углерода), занимает преимущественное время, характеризуется быстрым накаливанием оставшейся массы до температуры, превышающей температуру топки (до  $1100^{\circ}\text{C}$ ). Температура не растет выше, так как горючие элементы топлива полностью выгорают, масса частицы не изменяется, температура не растет. Горение в этой стадии происходит практически беспламенным образом. Оценивая роль каждой из рассмотренных стадий процесса горения, можно заключить, что основной стадией процесса горения твердого топлива является стадия выгорания кокса.

Существенное влияние на процесс горения частицы оказывают: скорость обдува частицы окислителем, размер частицы и реакционная способность. Рассмотрим это влияние подробнее на угольных коксах: кокс ДК - кокс из нефтяной коксующей добавки (ДК), кокс 9 - производственный кокс Губахинского коксохимзавода с добавкой к угольной шихте 50 % ДК и кокс 3 - производственный кокс Кемеровского коксохимзавода из 100% кузнецких углей. Образцы получены путем совместного или индивидуального пиролиза угольной шихты и ДК и последующего дробления. Проводилось изучение выгорания образцов коксов ( $m= 5-6$  г,  $d_{\text{экв}} \approx 20$  мм), предоставленных ООО «Проминтех НКА», в цилиндрическом муфеле (рис. 1). Потребляемая мощность

установки – 5 кВт, режим работы муфеля задавался на термодатчике и состоял из двух этапов нагрева муфеля до заданной температуры и поддержания этой температуры. Образец кокса размещался на центральной термопаре ( $T_c$ ), замерялась температура газовой среды в муфеле ( $T_p$ ) на расстоянии 5-7 мм от поверхности образца.

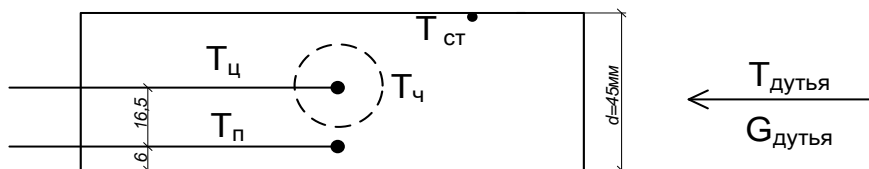


Рис. 1. Схема установки

В экспериментах без принудительного обдува одна сторона муфельной печи герметизировалась, чтобы исключить движения воздуха. В случае использования обдува она оставалась открытой, а в другую помещался промышленный воздухонагреватель, для подачи горячего дутья (расход воздуха  $30\text{ м}^3/\text{ч}$  ( $500\text{ л}/\text{мин}$ )). Температура в муфеле без обдува поддерживалась равной  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . С обдувом - температура газовой среды составила  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , на внутренней поверхности муфеля  $T_{ст} = 780\text{ }^\circ\text{C}$ , при включении обдува с температурой  $580\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 25 минут муфель остывает практически до температуры дутья.

В представленных образцах летучих мало, они не оказывают влияния на подготовку топлива к горению, этого процесса практически не происходит. В процесс горения вступает нелетучая угольная органическая масса, при достижении температуры воспламенения.

Процесс выгорания частицы происходит в несколько этапов (на примере кокс 10) сначала радиационно-конвективный разогрев частицы как инертного тела, следом слабый разогрев как преимущественно инертного тела при конкуренции излучения и конвекции. Начало горения дает интенсивный разогрев до температуры газовой среды в муфеле, и частица выгорает с постоянной скоростью, после выгорания большего количества углерода процесс завершается и зольный остаток остывает до температуры окружающего пространства печи.

Скорость горения коксов, которая определялась при сжигании кусков кокса в разогретом муфеле (рис. 2) в 3-5 раз меньше, чем высокорекреакционных топлив. По этому показателю коксы занимают последнее место в ряду «древесина – торф – бурый уголь – каменный уголь – антрацит – коксы». Сравнивая коксы между собой отмечаем, что наиболее плотный кокс из ДК выгорал с наименьшим перегревом за наибольшее время, а наименее плотный кокс 10 с большим перегревом, но за меньшее время.

При горении без обдува разогрев не столь интенсивный и скорость реакции заметно ниже, так как нет интенсивного подвода окислителя к углероду кокса, поэтому и время выгорания значительное.

$T, ^\circ\text{C}$

Рис. 2. Выгорание коксов без обдува ( $T_M$  – температура в муфеле  $900^\circ\text{C}$ )

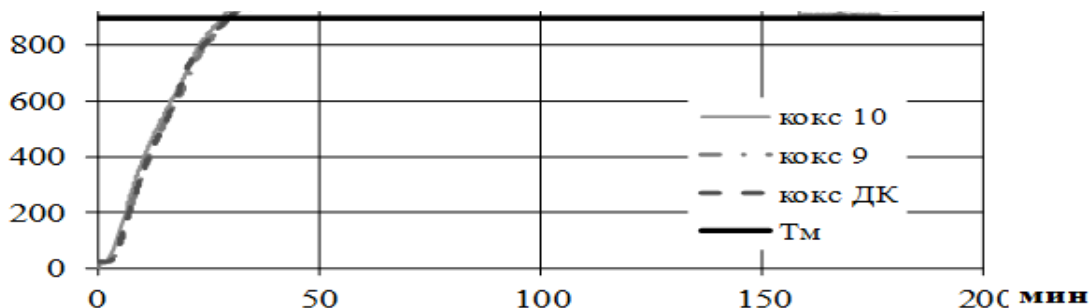


Рис. 2. Выгорание коксов без обдува ( $T_M$  – температура в муфеле  $900^\circ\text{C}$ )

Включение обдува интенсифицирует процесс разогрева и выгорания коксов (рис. 3). Кокс 10 разгорается медленнее остальных, центра перегревается над поверхностью позже чем кокс из ДК и кокс 9, что показывает низкую активность разгорания кокса после помещения в зону высоких температур. Перегрев центра от температуры муфеля и поверхности куска значительный. Кокс из ДК разгорается быстрее и активнее чем кокс 10, режим горения ровный без значительного повышения температуры куска относительно температуры газовой среды в муфеле, выгорает быстро. Температура горячей частицы лежит между значениями температур воздушного потока (дутья) и стенки. Кокс 9 ведет себя как смесь двух других (что по-видимому объясняется смешением свойств топлив из которых он получен, коксов ДК и 10), в начале разогрев достаточно быстрый, аналогичен коксу ДК, затем начинается рост температуры и перегрев относительно муфеля и поверхности меньше, чем у кокса 10, но больше чем у кокса ДК. Кокс 9 выгорает дольше, чем кокс 10, так как масса кусочка больше.

$T, ^\circ\text{C}$

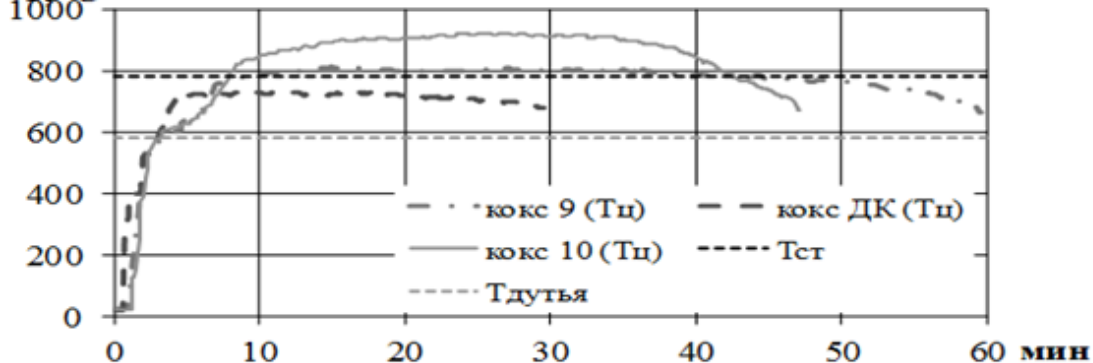


Рис. 3. Выгорание коксов с обдувом ( $T_{\text{дутья}} 580^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{стенки}} 780^\circ\text{C}$ )

Режим затухания у всех коксов аналогичен, падение температуры поверхности – это следствие выгорания частицы и понижения тепловыделения в окружающее пространство, хотя центр частицы может еще выгорать.

Сравнивая выгорание кокса 10 и кокса из ДК при обдуве (рис. 4) можно предположить, что горение кокса 10 происходит внутри (объемное горение), в виду высокой пористости поступает большее количество кислорода глубоко в поры частицы, и он вступает в реакцию с углеродом менее реакционноспособного кокса. Поэтому температура внутри частицы повышается, так как незначителен отток теплоты по каркасу и с дымовыми газами ввиду их низкой теплоемкости. Выгорание же кокса из ДК происходит в основном на поверхности, из-за большой плотности ограничен доступ кислорода внутрь частицы, и температура не растет быстро как у кокса 10. Благодаря интенсивному обдуву частицы происходит отток газообразных продуктов сгорания с поверхности частицы, таким образом, понижая температуру частицы.

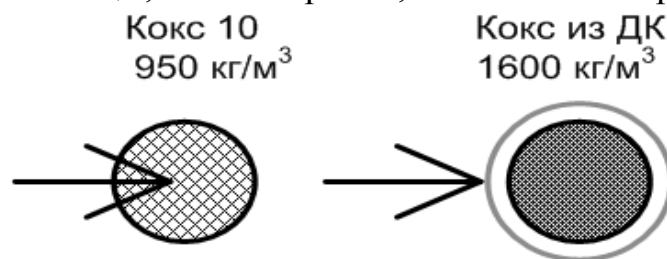


Рис. 4. Процесс выгорания коксов с обдувом

Выгорание по разным механизмам не противоречит данным по плотности образцов кокса. Различие температурных уровней происходит ввиду разной плотности частиц.

Скорость горения в относительных единицах (г/с) без обдува образцов (рис. 2) составляет: кокс 10 – 0,000481 г/с, кокс 9 – 0,000428 г/с, кокс из ДК – 0,000424 г/с. Скорость горения в относительных единицах (г/с) при обдуве образцов (рис. 3) на порядок выше чем без обдува и составляет: кокс 10 – 0,00211 г/с, кокс 9 – 0,00184 г/с, кокс из ДК – 0,00379 г/с. Перегрев центра частицы в случае обдува относительно температуры газовой среды в муфеле составляет: кокс 10 – 340°C, кокс из ДК – 170°C, кокс 9 – 250 °C. Скорость горения кокса из ДК выше при обдуве нагретым воздухом в 1,8 раза чем кокса 10, а перегрев меньше в 2 раза. Реакционная способность кокса из ДК наименьшая, следовательно, для роста скорости горения необходимы высокие уровни температур в печи.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. Изд-во Моск. ун-та, 1957. -452с.

Научный руководитель: Г.И. Худякова, ассистент, кафедры энергосбережения Уральский энергетический институт Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина.



## 6. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

### МОДУЛЯЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.Р. Шангараев, В.В. Звездин, В.М. Кузнецов

Камская государственная инженерно-экономическая академия

При воздействии импульсного лазерного излучения (ЛИ) на металл, в зоне взаимодействия возникают упругие механические колебания с частотой 30-600 кГц [1]. Спектры сигналов ультразвуковых колебаний (УЗК) находятся в области низких частот, но для повышения точности измерения параметров модуляционной функции, которая определяет показатели качества технологического процесса, применяем несущую частоту [2].

Модуляция является нелинейным процессом. В качестве несущей используется гармоническое колебание

$$U(t) = U_m \cos(\omega_0 + \varphi_0) \quad (1)$$

Модулирующий сигнал является гармоническим  $s(t)$  колебанием

$$s(t) = U_s \cos(\Omega t + \Phi_0) \quad (2)$$

$$U_{AM}(t) = U_m \cos(\omega_0 + \varphi_0) + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0] + \frac{mU_m}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] \quad (3)$$

Модуляция, таким образом, представляет собой процесс преобразования информационного сигнала на известную несущую, которая отвечает за показатели качества технологического процесса (ТП). Positionирование лазерного излучения относительно заданных размеров получаемых отверстий позволяет повысить точностные характеристики выполняемой технологической операции и определяется не только за счет программного управления положением фокуса ЛИ, но и за счет оптико-электронного метода измерения относительно начало координат [3].

Для исключения влияния помех на производстве, изменения зависимостей между амплитудой УЗК и показателями качества применяем модуляцию низкочастотных колебаний за счет включения высокочастотных УЗК (рис.1).

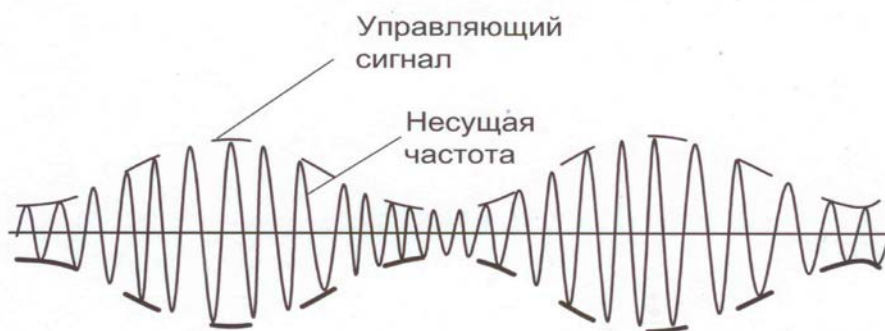


Рис. 1. Амплитудная модуляция несущей частоты ультразвуковых колебаний.

При воздействии ЛИ на металл в металле возникают механические колебания с частотой около 30 – 600 кГц несущей в себе информацию о параметрах ТП. Для повышения точности метода анализа УЗК, которые характеризуют показатели качества ТП, применяем метод модуляции несущей частоты генератора ультразвука. Несущая частота на порядок выше, чем частота УЗК, возникающих в результате воздействия ЛИ на металл. Амплитуда модуляционной функции пропорциональна глубине фокуса ЛИ зоны термического влияния. Модуляция позволяет исключить влияния помех, стабилизировать изменение зависимостей между амплитудой УЗК и показателями качества ТП. Это достигается модуляцией низкочастотных колебаний за счет включения высокочастотных ультразвуковых колебаний. Детектирование позволяет выделить модулирующую функцию и управлять ходом ТП. Для преобразования УЗК была разработана функциональная схема, позволяющая выделять информационный сигнал (рис.2).



Рис. 2. Функциональная схема

Анализ взаимосвязи параметров ультразвуковых колебаний с показателями качества технологического процесса, позволяет управлять ходом ТП, т.к. модуляционная функция УЗК несет информацию

о качестве получаемых отверстий в металлах. Это приводит к повышению экономической эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Исследование процесса влияния изменения мощности при газолазерной резке металлов / В.А. Песошин, В.В. Звездин, С.М. Портнов, Р.А. Кисаев И.Н. Кузнецов // Вестник КГТУ им. Туполева. - 2010. - № 2 – С. 43-46.
2. Система управления процессом термообработки концентрированными потоками энергии поверхности деталей / Портнов С.М., Р.Р. Саубанов, Р.А. Кисаев, И.Н. Кузнецов, И.Х. Исрафилов, В.В. Звездин, А.И. Нугуманова // Глобальный научный потенциал – научно-практический журнал №8. –СПБ, 2011. – С.95-100.
3. Позиционирование лазерного излучения относительно сварного шва как показатель качества технологического процесса / В. В. Звездин, А. В. Хамадеев, Р. Г. Загиров, И. Р. Шангареев // Вестник КГТУ им. Туполева, 2008. — № 3. — С.17-19.

Научный руководитель: В.В. Звездин, д.т.н. Камская государственная инженерно-экономическая академия.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИЯХ, ОБОГРЕВАЕМЫХ ГАЗОВЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ**

А.Э. Ни

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ2В

#### Введение

Газовый инфракрасный излучатель – разновидность теплового оборудования, обогреватель, используемый для нагрева предметов и обогрева помещений с помощью инфракрасного излучения. Актуальность использования и более подробное описание газовых инфракрасных излучателей рассмотрены в [1,2]. В работе [3] рассматриваются только потери теплоты теплопроводностью через кровлю здания без учета теплообмена в помещении.

Целью данной работы является математическое моделирование нестационарного теплообмена в помещении, обогреваемого газовым инфракрасным излучателем.

#### Постановка задачи

Рассматривается краевая задача кондуктивно – конвективного теплопереноса [4-5] для области, представленной на рисунке 1. В качестве источника тепловыделения используется газовый инфракрасный излучатель.

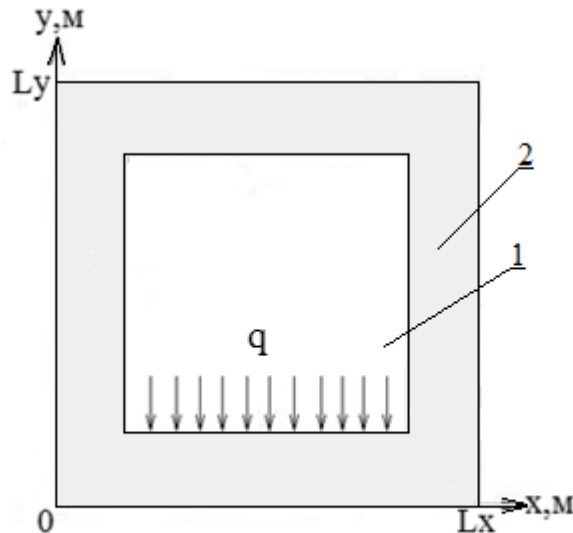


Рисунок 1 – Область решения рассматриваемой задачи:  
1) бетонные блоки; 2) воздух.

При проведении анализа предполагается, что теплофизические свойства ограждающей конструкции не зависят от температуры, а режим течения ламинарный. Воздух считается ньютоновской жидкостью, несжимаемой и удовлетворяющей приближению Буссинеска [6].

Поставленная задача математически описывается нестационарными уравнениями Навье – Стокса для воздуха и уравнением теплопроводности для стен. Безразмерные уравнения Буссинеска в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура» для данной задачи:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \cdot \nabla^2 \Omega + \frac{1}{2} \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Psi = -2 \cdot \Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr}}} \cdot \nabla^2 \Theta, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Fo_2} = \nabla^2 \Theta_2. \quad (4)$$

Уравнения (1) – (3) для воздуха, (4) для стенок, где

$\Theta$  – безразмерная температура;  
 $\Omega$  – безразмерный аналог вихря скорости;  
 $X, Y$  – безразмерные координаты;  
 $\nabla$  – оператор Набла;  
 $\Psi$  – безразмерный аналог функции тока;  
 $Ra$  – число Рэлея;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $Fo$  – число Фурье.

Начальные и граничные условия:

$$\Psi(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Omega(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Theta(X, Y, 0) = 0$$

$$X = 0, X = 1, 0 < Y < 1: \frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0,$$

$$Y = 0, Y = 1, 0 < X < 1: \frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0.$$

На внутренних границах твердой стенки и воздуха, параллельных оси  $OX$ :

$$\Psi = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_1 = \Theta_2, \\ \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial X}. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_3 = \Theta_4, \\ \frac{\partial \Theta_3}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \Theta_4}{\partial X}. \end{array} \right.$$

На внутренних границах твердой стенки и воздуха, параллельной оси  $OY$ :

$$\Psi = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0,$$

$$\begin{cases} \Theta_5 = \Theta_6, \\ \frac{\partial \Theta_5}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \Theta_6}{\partial X} + \text{Ki}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Theta_7 = \Theta_8, \\ \frac{\partial \Theta_7}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \Theta_8}{\partial X}. \end{cases}$$

Результаты численного моделирования

Для численного исследования принимались следующие значения безразмерных критериев:  $Ra=10^6$ ,  $Pr=0,71$ . Значение плотности теплового потока  $q=188 \frac{Вт}{м^2}$ .

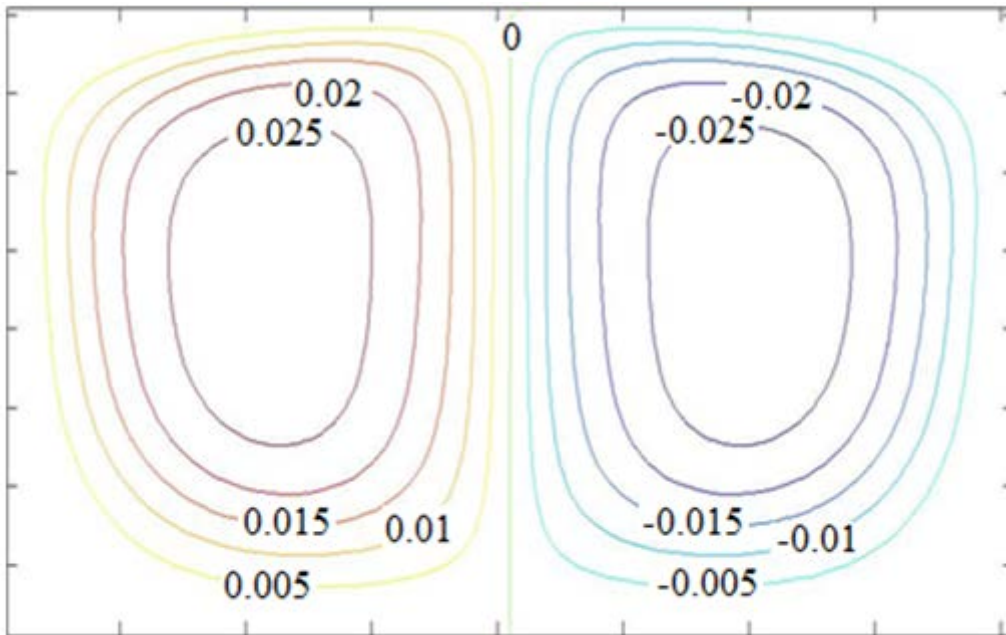


Рисунок 9 – Поле линии тока при времени  $t=3600$  с.

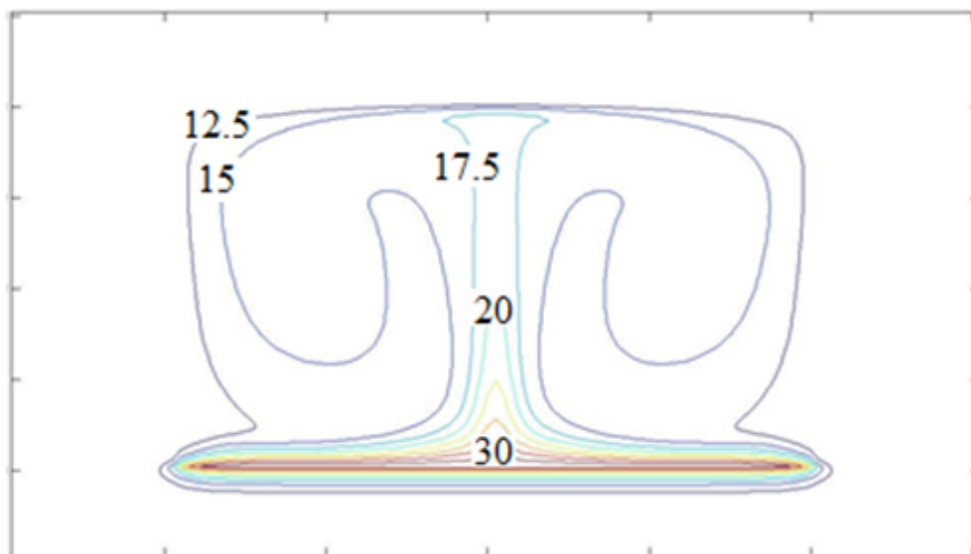


Рисунок 10 – Поле температур при времени  $t=3600$  с. (температура в градусах Цельсия)

#### Заключение

При наблюдении в динамике, помимо повышения температуры, принципиальных различий с течением времени не происходит. Линии тока и температура распределяются симметрично.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Мухлыгин И. Ю. Инновационные энергосберегающие технологии // Вестник Чувашского университета.- 2011.- №4.- С. 454 – 457.
2. Романова Е. А. Энергосберегающие системы газового отопления и вентиляции // Новые технологии и изобретения.- 2005.- №2.- С. 19 – 23.
3. Куриленко Н.И., Давлятчин Р. Р. Теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли // Вестник ТГАСУ.- 2009.- №4.- С. 132 – 141.
4. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен.- М.: Мир, 1983.- 400 с.
5. Лыков А. В. и др. Сопряженные задачи конвективного теплообмена / Лыков А. В., Алексашенко А. А., Алексашенко В. А.- Минск: Наука и техника, 1971.- 346 с.
6. Вавилов В. П., Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Моделирование нестационарного теплопереноса в системе теплоэнергопотребления с локально сосредоточенным источником теп-

ловыделения в сопряженной постановке.// Пром. Теплотехника.- 2005.- Т27.- № 4.- С. 43-55.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА**

А.С. Горшенин

Самарский государственный технический университет

В настоящее время все возрастающими темпами увеличивается ассортимент и объемы проката, получаемого из алюминиевых слитков. Анализ технологии производства цилиндрических слитков методом полунепрерывного литья в водоохлаждаемый кристаллизатор выявил главную проблему данного метода - образование неоднородной структуры слитка. Для ее устранения проводят термическую обработку слитков, одним из видов которой является гомогенизационный отжиг. Важным этапом термической обработки является охлаждение слитков после гомогенизации со скоростью, не превышающей критическую - 70 0С/ч для предотвращения закалки сплава. Проведенный анализ способов охлаждения алюминиевых слитков показал, что наиболее целесообразно использовать специальную камеру, позволяющую обеспечить заданную технологией скорость охлаждения слитков и повысить выработку качественной продукции.

В настоящее время отсутствуют методы расчета и режимы проведения процессов охлаждения, учитывающие геометрию садки и камеры охлаждения и обеспечивающие одинаковую скорость снижения температуры во всех частях алюминиевых слитков, а также способствующие снижению энергетических затрат.

В связи с этим совершенствование процесса охлаждения алюминиевых слитков воздухом на основе моделирования регулируемого конвективного теплообмена, обеспечивающего одинаковую скорость снижения их температуры во всех точках садки, является актуальной научной задачей, решение которой позволит обеспечить качество выпускаемой продукции.

Для изучения процесса охлаждения слитков в камере охлаждения автором была разработана математическая модель регулируемого конвективного теплообмена в системе алюминиевые слитки – охлаждающий воздух [1].

Математическая модель конвективного теплообмена в системе ряд горизонтальных алюминиевых слитков – охлаждающий воздух



включает в себя расчетную схему (рис. 1), описание процесса теплообмена, ограничение по скорости охлаждения слитков (1), систему уравнений (2) и (3) по изменению температур слитков и воздуха

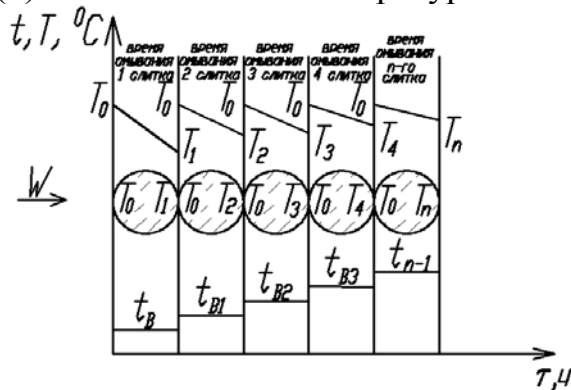


Рис. 1. Расчетная схема к математической модели

При разработке математической модели регулируемого конвективного теплообмена было принято ограничение по скорости охлаждения слитков  $\frac{dT}{d\tau}$ , которая в интервале температур 500–300°С не должна превышать

$$\frac{dT}{d\tau} \leq 70 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч}, \quad (1)$$

Система уравнений (2) и (3) по снижению температур  $T_N$  каждого из алюминиевых слитков количеством  $N$ , расположенных в горизонтальном ряду и по увеличению температур воздуха  $t_{B_N}$  выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} & T_N = t_{B_{N-1}} + (T_0 - t_{B_{N-1}}) \times \\ & \times \exp \left[ -4 \cdot \frac{0,021 \cdot \left( \frac{G_B \cdot \nu}{N \cdot d(h - \pi \cdot d/2)} d_{\text{экв}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \cdot \lambda_B \cdot \varepsilon \cdot d}{\lambda_{\text{АЛ}} \cdot d_{\text{экв}}} \cdot \frac{a \cdot \tau}{d^2} \right] \quad (2) \\ & t_{B_N} = t_{B_{(N-1)}} + \frac{c_{\text{Пал}}}{c_{\text{Рв}}} \frac{m_{\text{ал}}}{G_B} \left[ (T_{(N-1)} - t_{B_{(N-1)}}) - (T_0 - t_{B1}) \times \right. \\ & \left. \times \exp \left[ -4 \cdot \frac{0,021 \cdot \left( \frac{G_B \cdot \nu}{N \cdot d(h - \pi \cdot d/2)} d_{\text{экв}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \cdot \lambda_B \cdot \varepsilon \cdot d}{\lambda_{\text{АЛ}} \cdot d_{\text{экв}}} \cdot \frac{a \cdot \tau}{d^2} \right] \right] \quad (3) \end{aligned} \right\}$$

Полученная математическая модель регулируемого конвективного теплообмена позволила провести аналитическое исследование конвективного теплообмена в камере охлаждения с использованием уравнений (2) и (3) полученной математической модели. Результаты аналитического исследования конвективного теплообмена в камере охлаждения при поддержании постоянной в процессе охлаждения

скорости воздуха  $W, \text{ м/с}$  для слитка диаметром  $d = 0,24, \text{ м}$  приведены на рис. 2.

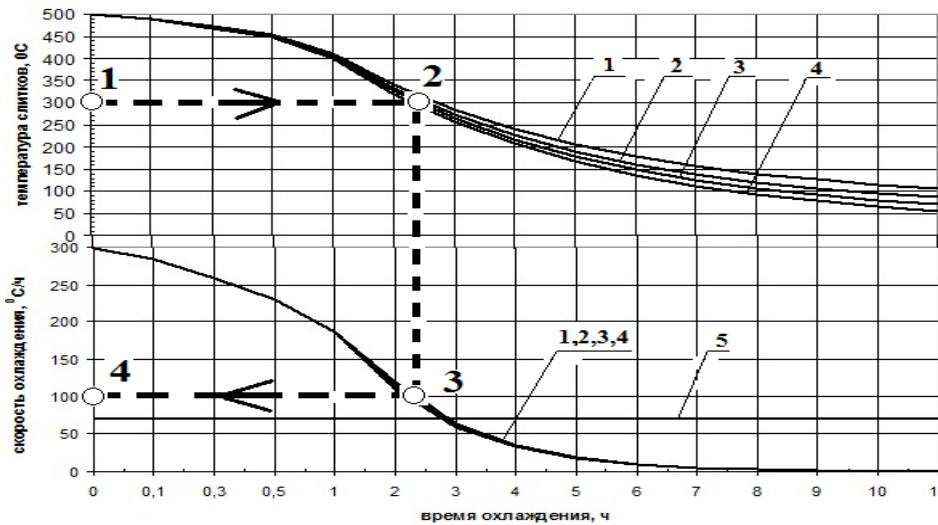


Рис. 2. Изменение температуры и скорости охлаждения слитков от продолжительности охлаждения при постоянной скорости охлаждения  $W = 1,1 \text{ м/с}$  (1,2,...,4 – номера слитков, 5 – максимальная скорость охлаждения)

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что при поддержании постоянной скорости охлаждающего воздуха  $w = \text{const}$  в процессе охлаждения не удастся обеспечить заданную технологией скорость охлаждения  $T/\tau = 70 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ , что приводит к снижению качества продукции вследствие закалки слитков. Кроме этого сохранение постоянной скорости воздуха  $w = \text{const}$  увеличивает продолжительность периода охлаждения. В связи с этим было проведено аналитическое исследование регулируемого конвективного теплообмена в камере охлаждения при переменной скорости воздуха  $W, \text{ м/с}$  для слитка диаметром  $d = 0,24, \text{ м}$  с высотой канала  $\delta = 0,1 \text{ м}$ , результаты которого приведены на рис. 3.

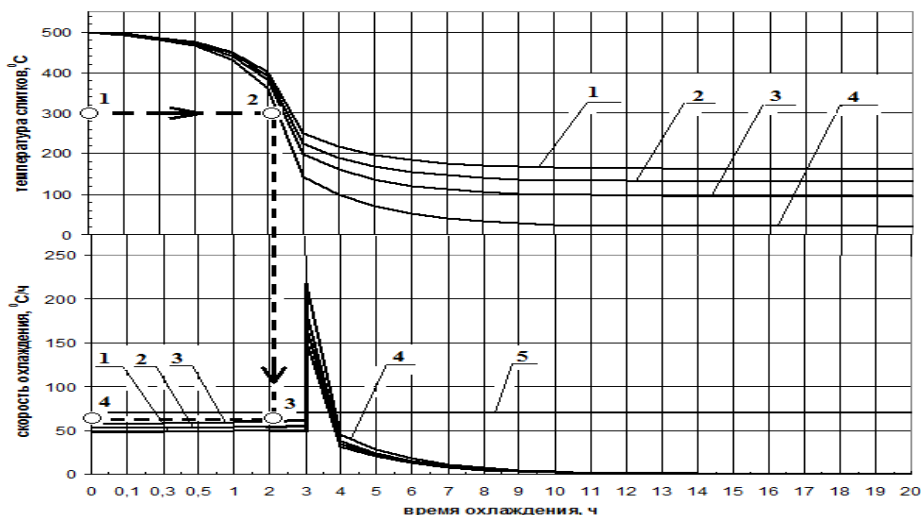


Рис. 3. Зависимость температуры и скорости охлаждения слитков от времени охлаждения,  $d = 0,24\text{ м}$ ,  $\delta = 0,1\text{ м}$  при переменной скорости воздуха  $W$  (1,2,...,8 – номера слитков)

График изменения температур и скорости охлаждения слитков, представленные на рис. 3, подтверждает влияние переменной скорости охлаждающего воздуха  $W$ , м/с на скорость охлаждения слитков  $T/\tau$ ,  $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  и время охлаждения  $\tau$ , ч. Поддержание расчетной скорости воздуха при охлаждении слитков до  $300^{\circ}\text{C}$  позволяет выдерживать скорость их охлаждения, не приводящую к их закалке и тем самым повышать выработку качественной продукции. Увеличение скорости воздуха до максимальной после охлаждения слитков ниже  $300^{\circ}\text{C}$  позволяет существенно ускорить процесс охлаждения. Общее время охлаждения определяется только заданной технологией конечной температурой слитков.

Для доказательства достоверности математической модели теплообмена было проведено экспериментальное исследование. Среднее расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 34%. Полученная погрешность позволяет рекомендовать полученную математическую модель для применения в проектной и эксплуатационной практике.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горшенин А.С. Математическое моделирование теплообмена при охлаждении ряда алюминиевых слитков // Вестник СГАУ. – 2012. - № 2(33). – С. 179 – 183.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В МОРОЗИЛЬНОЙ КАМЕРЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Т.Е. Смышляева, А.Э. Опалев  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ21

В наше время трудно представить себе жизнь без холодильного оборудования. Комплекс взаимосвязанных процессов, влияющих на распределение температур в морозильных камерах холодильных установок сложно анализировать аналитически. Поэтому, для оптимизации работы холодильного оборудования необходимо применять единственный реальный метод исследования распределения температур в морозильных камерах – численное моделирование.

Физическая и геометрическая модели

Рассматривается область решения задачи теплопереноса, представленная на рисунке 1. Предполагалось, что на границах тепловой изоляции присутствуют граничные условия первого рода,  $T = T_e$ , где  $T_e$  – температура окружающей среды. Тепловая изоляция морозильной камеры (м.к.) – пенополиуретан. На внутренних границах м.к. – граничные условия первого рода  $T = T_x$ , где  $T_x$  – температура холодильного агента. При постановке задачи принят ряд допущений, что позволило упростить постановку задачи – теплофизические свойства тепловой изоляции и воздуха в морозильной камере не зависят от температуры.

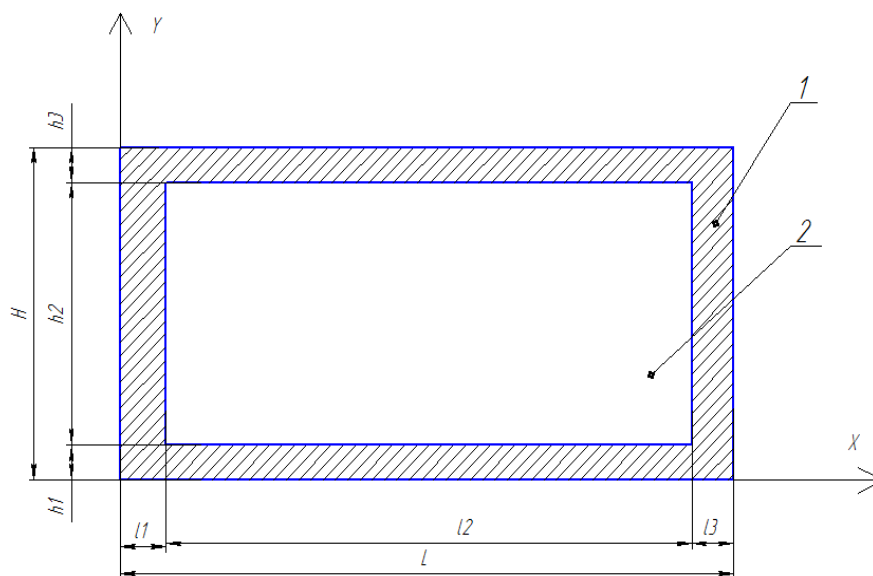


Рис. 1. морозильная камера, где 1 – тепловая изоляция корпуса, 2 – область внутри морозильной камеры (воздух).

### Математическая модель

Процесс переноса тепла в области внутри морозильной камеры описывается системой нестационарных двумерных уравнений естественной конвекции в приближении Буссинеска [1].

Для приведения системы уравнений к безразмерному виду использовались следующие соотношения:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}, \quad U = \frac{u}{V_{in}}, \quad V = \frac{v}{V_{in}}, \quad \Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad \Psi = \frac{\psi}{\psi_0}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0},$$

$$\Delta T = T_{in} - T_0, \quad \psi_0 = V_{in}L, \quad \omega_0 = \frac{V_{in}}{L};$$

Безразмерные уравнения Навье-Стокса в переменных «вихрь скорости – функции тока – температура» для рассматриваемой задачи (для газовой фазы морозильной камеры)[2]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{Gr}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Theta}{\partial X} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Gr}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -2 \cdot \Omega. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности для твердой фазы (тепловой изоляции морозильной камеры):

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Y^2} \right), \quad (4)$$

где  $x, y$  – размерные координаты;  $X, Y$  – безразмерные координаты, соответствующие  $x, y$ ;  $L$  – длина полости по оси  $x$ ;  $t_0$  – масштаб времени;  $\tau$  – безразмерное время;  $u, v$  – скорости по осям  $x, y$  соответственно;  $U, V$  – безразмерные скорости соответствующие  $u, v$ ;  $V_{in}$  – масштаб скорости (скорость потока на входе);  $\Theta$  – безразмерная температура;  $T_0$  – температура газа и твердого тела в начальный момент времени;  $T_{in}$  – температура входного потока;  $\psi$  – функция тока;  $\psi_0$  – масштаб функции тока;  $\Psi$  – безразмерный аналог  $\psi$ ;  $\omega$  – вихрь скорости;  $\omega_0$  – масштаб вихря скорости;  $\Omega$  – безразмерный аналог  $\omega$ ,

$Fo = \frac{a \cdot \tau}{L^2}$  – критерий Фурье.

Граничные условия:

Для внешних границ тепловой изоляции задаются граничные условия первого рода  $\Theta_e = 1$ .

Для внутренних границ м.к.:

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \\ \Theta_x = 0. \end{array} \right\} \text{при} \left\{ \begin{array}{l} X = \frac{l_1}{L}, \quad \frac{h_1}{L} \leq Y \leq \frac{h_1 + h_2}{L}. \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \\ \Theta_x = 0. \end{array} \right\} \text{при} \left\{ \begin{array}{l} X = \frac{l_1 + l_2}{L}, \quad \frac{h_1}{L} \leq Y \leq \frac{h_1 + h_2}{L}. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \\ \Theta_x = 0. \end{array} \right\} \text{при} \left\{ \begin{array}{l} Y = \frac{h_1}{L}, \quad \frac{l_1}{L} \leq X \leq \frac{l_1 + l_2}{L}. \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \\ \Theta_x = 0. \end{array} \right\} \text{при} \left\{ \begin{array}{l} Y = \frac{h_1 + h_2}{L}, \quad \frac{l_1}{L} \leq X \leq \frac{l_1 + l_2}{L}. \end{array} \right. \quad (8)$$

В результате численного решения задачи получены распределения температур в морозильной камере с учетом естественной конвекции, характеризующие основные закономерности рассматриваемого процесса.

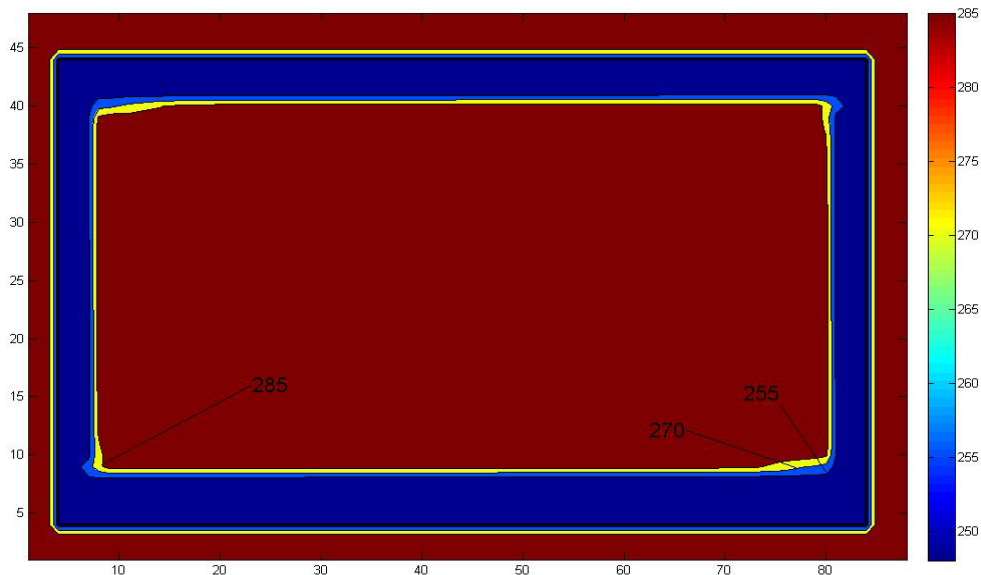


Рис. 2. Распределение температур в морозильной камере для модели естественной конвекции.

В настоящей работе проведено математическое моделирование естественной конвекции в морозильной камере холодильной установ-

ки. Разработаны физическая, геометрическая и математическая модели. Составлена программа, для моделирования процесса естественной конвекции в морозильной камере, в среде MatLab. Получены распределения температур в морозильной камере с учетом естественной конвекции, характеризующие основные закономерности рассматриваемого процесса. С учетом естественной конвекции, в данной модели, наблюдается неравномерное распределение температур.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. –172 с.
2. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло и массообмена: учебное пособие. – Москва: Изд-во «Наука», 1984. – 284 с.
3. Кузнецов Г.В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 4: Энергетика. – С. 18-23.

Научный руководитель: В.И. Максимов, к.т.н., доцент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДНОГО РАСТВОРА НАСЛ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Е.Г. Орлова

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ2В

Задача об испарении капли, лежащей на подложке, в процессе нагрева неоднократно рассматривалась, начиная с работ Максвелла. В настоящее время к проблеме испарения капель различных растворов обращено еще больше внимания в связи с появлением разнообразных применений. В данной работе представлены экспериментальные результаты по испарению капли водно-солевого раствора на твердых подложках.

Цель работы: проведение экспериментальных исследований по испарению капли на твердой подложке при ее интенсивном нагреве, а также расширение теоретических основ испарения капель растворов.

Эксперимент проводился на 5 разных подложках, три с гладкой поверхностью (нержавеющая сталь, анодированный алюминий, отожженная медь), остальные с шероховатостью (медь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 100 мкм, нержавеющая сталь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 10 мкм).

Подложки предварительно замачивались в дистиллированной воде в течение суток. При проведении экспериментальных исследований нагревались с помощью элемента Пельтье до стационарного режима при температуре  $75^\circ C$ .

В качестве исследуемой жидкости принят раствор NaCl с тремя концентрациями: 4,8%; 9,1%, 16,7% (по масс.). Капля заданного объема (0,1 мл) помещалась на заранее нагретую поверхность с помощью шприца и испарялась в атмосферу.

Эксперименты проводились на установке, представленной на рисунке 1.

Для проведения экспериментов использовались две методики: теневая и Шлирин методика. С помощью теневой методики получены видеокadres капель, а Шлирин система применялась только для визуального контроля, поскольку капли наносились с помощью медицинского шприца. Теневое изображение обрабатывалось с помощью программного обеспечения Kruss (метод Юнга-Лапласа).

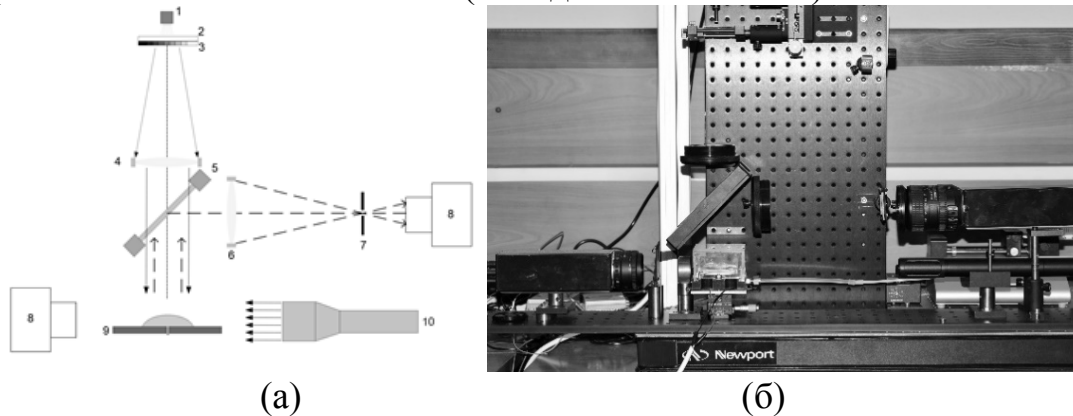


Рис. 1. Оптическая схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки: 1 – источник света; 2 – матовое стекло; 3 – шлирин фильтр; 4 – коллимирующая линза; 5 – делитель пучка; 6 – шлирин линза; 7 – непрозрачный щит; 8 – камера; 9 – образец; 10 – источник света для теневой методики.

В результате обработки экспериментальных данных получены графические зависимости скорости испарения капель с двумя концентрациями на шероховатой и гладкой подложках.

По результатам анализа графических зависимостей (рис. 2) установлено, что на шероховатой подложке при наибольшей концентрации соли в растворе скорость испарения капли наибольшая, т.е.



при увеличении концентрации соли в растворе увеличивается скорость испарения, что соответствует экспериментальным данным полученным другими авторами [1].

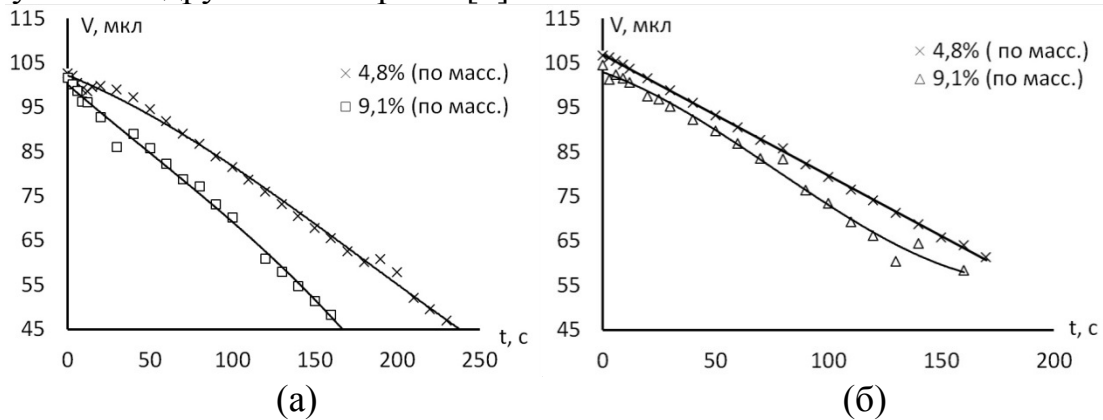


Рис. 2. Скорость испарения капель различной концентрации: (а) медная подложка с шероховатостью 100мкм; (б) анодированный алюминий.

Согласно теории смачивания и курсу коллоидной химии уменьшение поверхностного натяжения приводит к улучшению смачиваемости поверхности, т.е. к уменьшению контактного угла. Однако при увеличении концентрации раствора соли незначительно повышается поверхностное натяжение, что приводит к росту контактного угла. Данная теория подтверждается экспериментальными данными (рис. 3).

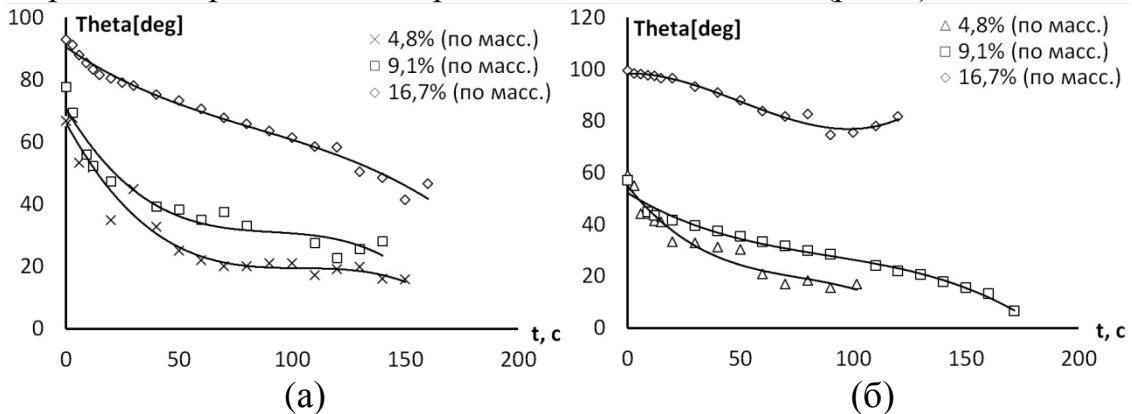


Рис. 3. Скорость изменения контактного угла капель различной концентрации: (а) подложка из нержавеющей стали с шероховатостью 10мкм; (б) подложка из гладкой нержавеющей стали.

По результатам анализа графической зависимости представленной на рис. 4 установлено, что шероховатость поверхностей улучшает растекание капли, т.е. уменьшает контактный угол. Данное утверждение касается гидрофильных подложек (контактный угол капли меньше  $90^\circ$ ).

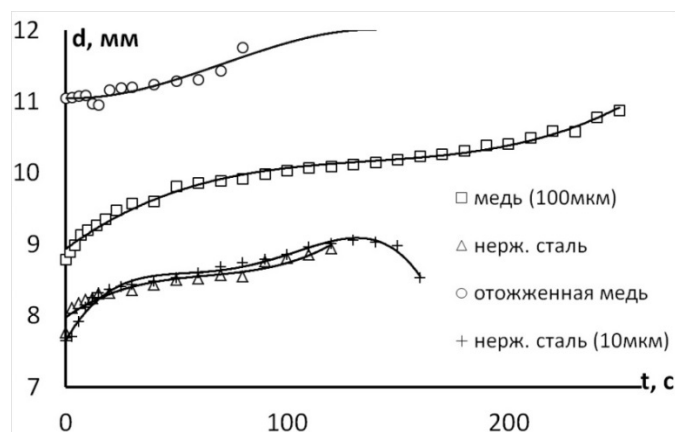


Рис. 4. Изменение диаметра капель с концентрацией 9,1% и объемом 0,1мл на различных подложках.

При испарении капли на подложках с известной шероховатостью (медь 100мкм, нержавеющая сталь 10мкм) осуществляется процесс обратного депиннинга, т.е. происходит движение контактной линии. Капля растекается в процессе всего испарения и до начала кристаллизации солей.

На подложках из нержавеющей стали 10 мкм в процессе кристаллизации осуществляется пиннинг контактной линии на протяжении нескольких секунд, затем происходит уменьшение диаметра. Это обусловлено тем, что соль выпадает в осадок по окружности капли, в местах наибольшей концентрации.

В процессе испарения капли на гладких подложках (нержавеющая сталь, отожженная медь) по сравнению с шероховатыми диаметр увеличивается медленнее (т.е. капля растекается спустя 30 – 40 секунд после начала процесса испарения).

В результате проведенных экспериментов обнаружен режим испарения солевых растворов, так называемый обратный депиннинг (растекание), отличающийся от режимов испарения воды (при неизменной площади или неизменном контактном угле) [2]. Возможно, что причиной растекания капель может служить эффект Марангони, возникающий из-за наличия температурных и концентрационных градиентов. Градиенты появляются на разных участках поверхности и в объеме капли, что приводит к неоднородности поверхностного натяжения, инициирующей конвективные течения Марангони [3].

Установлено, что при испарении капли солевого раствора на шероховатых поверхностях растекание капли происходит в течение всего процесса испарения до момента начала кристаллизации солей, которая наблюдается по окружности капли. Пиннинг начинается в процессе кристаллизации на шероховатых поверхностях.

В процессе испарения на гладких поверхностях начало растекания капли наблюдается в момент увеличения концентрации вблизи контактной линии. Пиннинг капли наблюдается в начале процесса испарения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чесноков М.Н., Казакова И.Н., Грызунова Т.В., Андрианова И.С. Испарение капель водных растворов натрий – хлор в электрическом поле// Физика аэродисперсных систем.- 2001.- вып. 38.- С. 170-176.
2. H. Yildirim Erbil et al. Drop Evaporation on Solid Surfaces: Constant Contact Angle Mode// Langmuir.- 2002.- N 18.- с. 2636-2641.
3. Тарасевич Ю.Ю., Православнова Д.М. Качественный анализ закономерностей высыхания капли многокомпонентного раствора на твердой подложке// Журнал технической физики.- 2007. вып.2.- с. 17-21.

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, ассистент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ**

И.О. Мингазетина  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ2В

Процесс испарения капель изучается уже на протяжении 200 лет. В последнее время повысился интерес к механизму явлений в капле по причине того, что открываются перспективные направления исследований и новые приложения. Основоположником теории стационарного испарения сферической капли является Максвелл. В настоящее время существуют различные решения задачи об испарении на плоской подложке, каждое из которых имеет свои особенности [1]. В данной работе представлены результаты исследования капель дистиллированной воды на подложках из различного материала с разной шероховатостью.

Проведение эксперимента основано на теневой методике (рис.1). В качестве рабочей жидкости для изучения изменения формы

и размеров капли в процессе испарения использовалась дистиллированная вода. В результате обработки данных получены графические зависимости скорости испарения, изменения краевого угла смачивания и диаметра капли.

Цель работы: проведение экспериментальных исследований по испарению капли дистиллированной воды на твердой подложке при ее интенсивном нагреве и расширение теоретических основ испарения капель воды.

Проведение эксперимента осуществлялось на 6 различных подложках, две с гладкой поверхностью, четыре с шероховатостью. В эксперименте использовались следующие подложки: нержавеющая сталь; сталь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 10мкм; сталь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 100мкм; отожженная медь; медь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 10мкм; медь, бомбардированная частицами  $Al_2O_3$  размером 100мкм.

Вышеперечисленные подложки предварительно замачивались в дистиллированной воде, затем нагревались с помощью элемента Пельтье до выхода на стационарный режим (температура  $75^{\circ}C$ ). Термомпары располагались на нижней стороне подложки.

Объектом изучения являлась дистиллированная вода. Капли объемом 0,1мл с помощью шприца наносились на твердую подложку. Принцип теневой методики основан на освещении капли воды равномерным светом, параллельным подложке. Часть света рассеивалась каплей. Нерассеянный свет фиксировался камерой Fastvideo-500M. Таким образом, получены теневые изображения капли (Рис.1). Информацию об основных геометрических параметрах капли: контактном радиусе, краевом угле, высоте, объеме получили из анализа формы полученной тени с помощью программы Kruss.

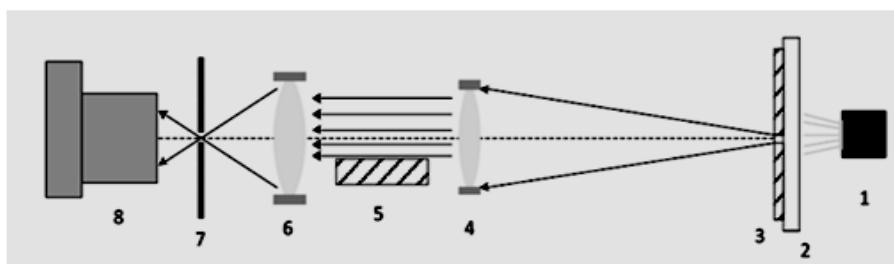


Рис.1 Схема оптической системы: 1 – источник света; 2 – матовое стекло, 3 – щель, 4 – коллимирующая линза, 5 – подложка, 6 – конденсирующая линза; 7 – непрозрачный щит с отверстием; 8 – камера

Ниже представлены графические зависимости скорости изменения контактного угла на подложках из стали и меди, имеющие раз-

личную шероховатость (рис.3-4) и скорость изменения контактного диаметра капли размером 0,1ml.

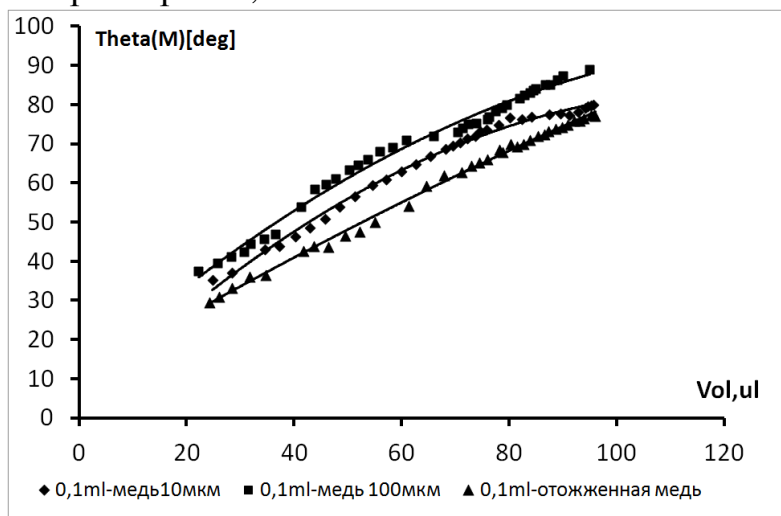


Рис.3 Скорость изменения контактного угла капель на подложке из меди с разной шероховатостью

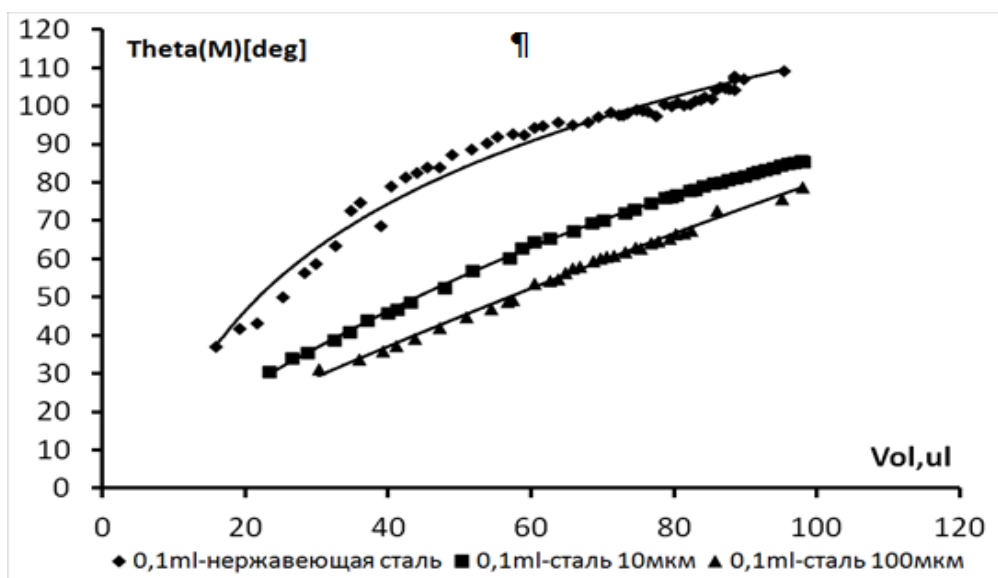


Рис.4. Скорость изменения контурного угла капель на подложке из стали с разной шероховатостью

По результатам анализа графических зависимостей установлено, что медные подложки обладают гидрофильными свойствами (краевой угол меньше  $90^{\circ}$ С), но с повышением шероховатости происходит увеличение начального краевого угла, т.е. ухудшаются свойства смачиваемости поверхности (рис.3). На подложках из стали виден обратный эффект (рис.4) – шероховатость увеличивает свойства гидрофильности. Следует отметить, что первоначальный угол на подложке из нержавеющей стали больше  $90^{\circ}$ С, т.е. поверхность изначально считается гидрофобной, но с течением времени капля растекается по подложке,

уменьшается краевой угол смачивания. Чем ниже краевой угол смачивания, тем более гидрофильна поверхность.

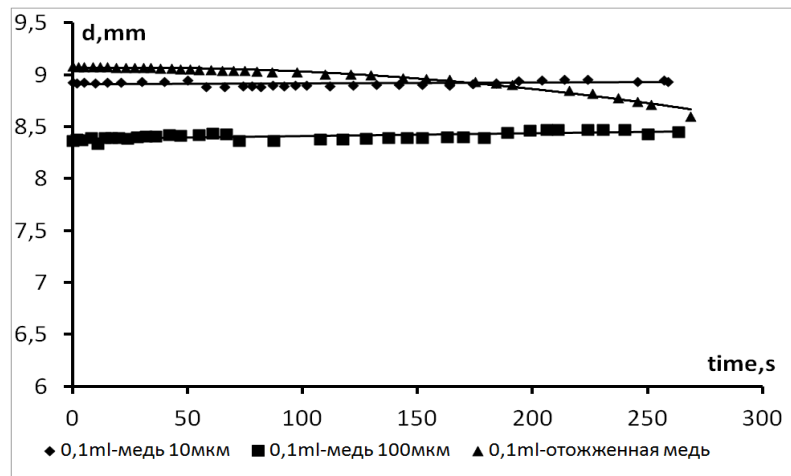


Рис. 5 Скорость изменения контактного диаметра капли на подложке из меди с разной шероховатостью

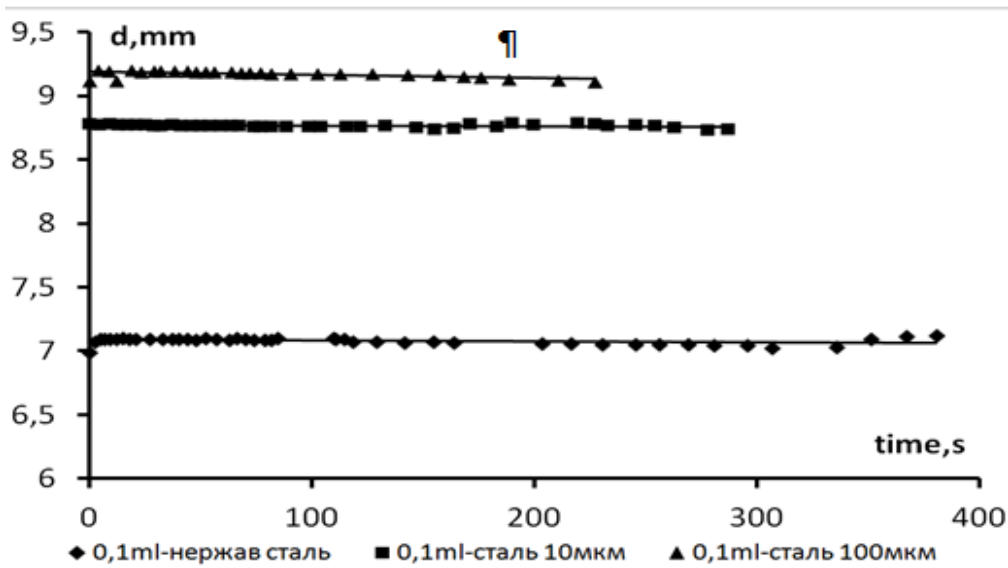


Рис. 6. Скорость изменения контактного диаметра капли на подложке из стали с разной шероховатостью

В процессе испарения капли с поверхности подложки постоянно изменяются геометрические параметры капли. Этот характер изменения обусловлен постоянным уменьшением веса капли и изменением ее линейных размеров [2]. По результатам анализа графического отображения экспериментальных данных на рис.5 установлено, что на подложках из меди, бомбардированных частицами  $Al_2O_3$  размерами 10 мкм и 100 мкм контактный диаметр остается постоянным на протяжении всего процесса испарения, а на подложке из отоженной меди наблюдается депиннинг контактной линии (диаметр капли уменьшается с 9,05 мм до 8,6 мм). Таким образом, на подложках с шероховатостями ли-

ния контакта трех фаз удерживается неподвижной достаточно долго, «зацепившись» за дефекты на поверхности подложек. По результатам анализа графической зависимости на рис.6 установлено, что шероховатость не влияет на изменение контактного диаметра, наблюдается пиннинг контактной линии.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова. Геометрия, циркуляция и тепломассообмен при испарении капли на подложке// Вестник ТГТУ.-2011.- Том 17. № 2.-С.371-387.
2. А.Н. Пахомов, Е.А. Ильин. Алгоритм расчета кинетики испарения капли жидкости, нанесенной на горизонтальную диффузионно-непроницаемую подложку//Вопросы современной науки и практики. – 2013.- №2.-С.292-296.

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, ассистент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ТВЕРДЫХ И ГЕЛЕОБРАЗНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА**

Д.О. Глушков  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП

Твердые и гелеобразные конденсированные вещества (КВ) получили широкое применение в качестве топлив для специальных и энергетических установок. Эти высокоэнергетические материалы отличаются фазовым состоянием, теплофизическими и кинетическими характеристиками, механизмами зажигания и горения.

Достаточно актуальной является задача инициирования процесса стационарного горения топлива. В настоящее время для зажигания КВ используют традиционные технологии, основанные на применении высокотемпературных газов, потоков лучистой энергии и электрических разрядов. Однако еще в 60-х годах прошлого столетия отмечалось (М. Саммерфилд, П.Л. Кауан), что возможно зажигание твердых ракетных топлив одиночными нагретыми до высоких температур частицами. Такой способ инициирования горения является перспективным для повышения энергоэффективности процесса.

Условия взаимодействия «горячих» частиц с КВ отличаются от условий прогрева топлив массивными энергоемкими источниками (например, большими пластинами), температура которых может обоснованно приниматься постоянной в течение индукционного периода. Разработка новой методики требует более детального изучения процесса, поэтому целью работы является численное исследование макроскопических закономерностей зажигания твердых и гелеобразных топлив одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих при зажигании высокоэнергетических материалов, проводилось на примере системы «одиночная частица – конденсированное вещество – газ» (рис. 1). При моделировании гетерогенной структуры металлизированного смесевого топлива учитывалась реальная неоднородная структура вещества, обусловленная частицами алюминия. При этом в области решения выделялись участки, соответствующие частицам металла (алюминий), а также смеси веществ, способных к экзотермическому реагированию (например, бутилкаучук и перхлорат аммония). При моделировании зажигания гелеобразного КВ предполагалось, что оно имеет гомогенную структуру, представляющую собой смесь окислителя (сжиженный кислород), горючего (гидразин), солей и гидратов при температуре близкой к криогенной. В качестве источников зажигания рассматривались одиночные частицы в форме параллелепипедов и дисков малых размеров.

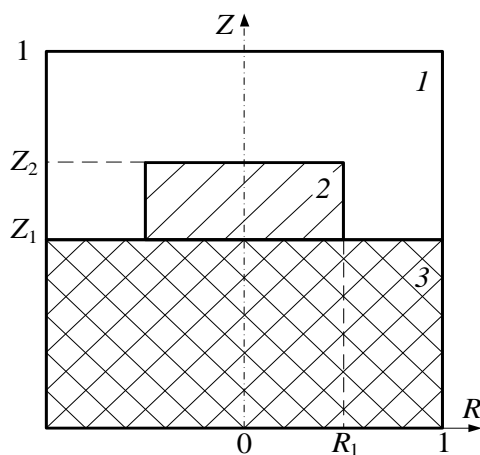


Рис.1. Схема области решения задачи зажигания:

$1$  – газ,  $2$  – «горячая» частица,  $3$  – конденсированное вещество

При исследовании зажигания гелеобразного топлива предполагалось, что локальный источник энергии инерционно осаждается на поверхность КВ. За счет тепла «горячей» частицы приповерхностный слой топлива прогревается. Ускоряются процессы плавления веще-



ства, находящегося в начальный момент времени при криогенных температурах в твердом агрегатном состоянии. При достижении условий парообразования происходит испарение гелеобразной структуры «горючее – окислитель». Пары горючего и окислителя поступают в область, заполненную инертным газом. В малой окрестности частицы формируется парогазовая смесь. При достижении достаточных для воспламенения температур и концентраций компонентов смеси происходит зажигание.

При исследовании процессов зажигания металлизированного смесевое твердого топлива предполагалась реализация твердофазного механизма зажигания (процесс газификации КВ в течение индукционного периода не рассматривался).

Приняты следующие условия зажигания:

1. Теплоприход за счет экзотермической реакции превышает теплоотвод от источника нагрева в КВ и газовую область.
2. Температура в зоне локализации ведущей реакции окисления превышает начальную температуру «горячей» частицы.

Математические модели для систем «одиночная частица – металлизированное смесевое топливо – газ» [1], «одиночная частица – гелеобразное топливо – газ» [2] представлены соответствующими системами нелинейных дифференциальных уравнений математической физики, описывающих процессы переноса энергии, количества движения и массы паров горючего вещества, химического реагирования, прогрева воспламеняемого вещества и последующих фазовых переходов.

Системы дифференциальных уравнений в частных производных решались методом конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально-одномерным методом. Метод итераций и метод прогонки применялись для решения одномерных разностных уравнений. Достоверность полученных результатов определялась проверкой консервативности разностной схемы и сравнением с результатами экспериментальных исследований.

Основные результаты теоретических исследований в виде зависимостей безразмерных времен задержки зажигания КВ ( $\tau_d$ ) от безразмерных начальных температур ( $\Theta_p$ ) одиночных горячих частиц представлены на рис. 2, 3.

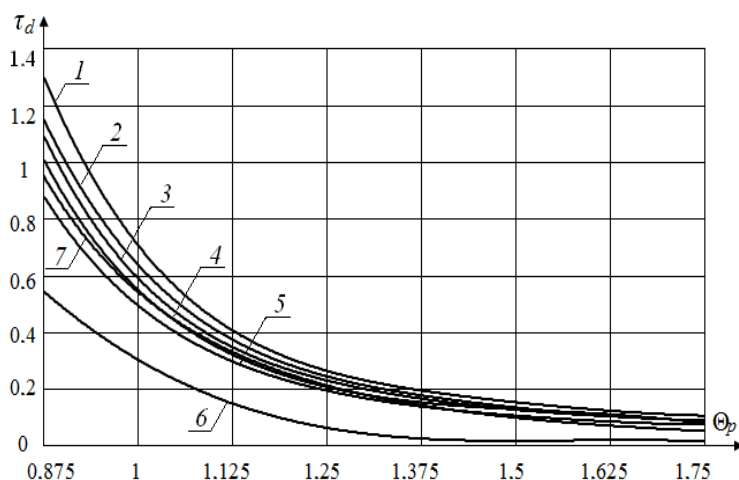


Рис. 2. Времена задержки зажигания смесового топлива в зависимости от начальной температуры источника энергии: 1 – конвективный теплоотвод (при усреднении теплофизических характеристик топлива); 2 – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива,  $Z_p=0.5R_p$ ); 3 – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива,  $Z_p=R_p$ ); 4 – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива,  $Z_p=1.5R_p$ ); 5 – кондуктивный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива); 6 – нагрев топлива массивной «горячей» пластиной (при учете структурной неоднородности топлива); 7 – экспериментальная кривая

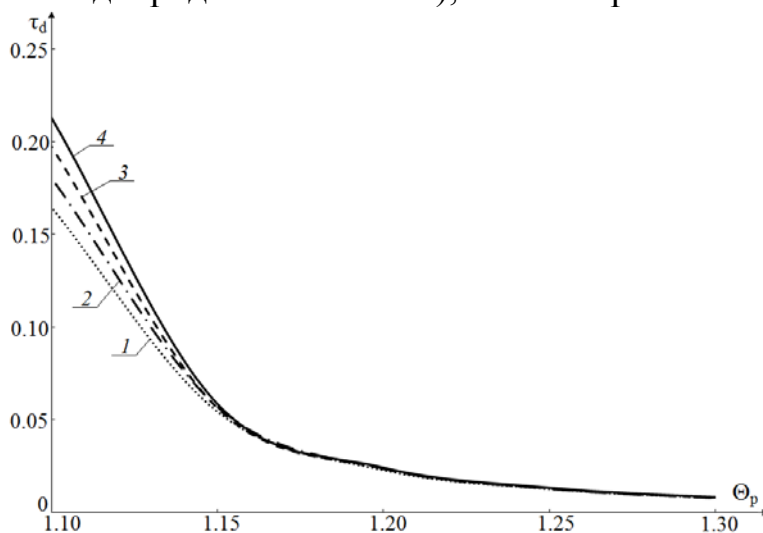


Рис. 3. Зависимость времени задержки зажигания гелеобразного топлива от температуры одиночных разогретых частиц из различного материала при  $R_d=Z_d=0.15$ : 1 – сталь, 2 – алюминий, 3 – керамика, 4 – углерод

В результате анализа интегральных характеристик процесса установлено, что одиночные нагретые до высоких температур метал-

лические и неметаллические частицы с теплосодержанием более 0.2 кДж способны инициировать горение КВ в системе (рис. 1).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-33002).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical simulation of solid phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature // Russian journal of physical chemistry B. – 2011. – Vol.5. – No.6. – P. 1000–1006.
2. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Computational investigation of heat and mass transfer processes in a gel-like fuel ignited by a limited-capacity source // Journal of engineering physics and thermophysics. – 2013. – Vol.86. – No.3. – P. 695–704.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ОТ ДВУХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ТЕЛЕ**

О.Н. Попов, Н.П. Жуков

Тамбовский государственный технический университет

Реализация контактного метода неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) усложнена тем, что тепловое воздействие и получение измерительной информации в ходе эксперимента возможно осуществлять только на ограниченном участке поверхности исследуемого объекта. Поэтому наиболее важной и сложной задачей при создании теплового метода НК является разработка математической модели, адекватно описывающей реальный процесс теплопереноса в объекте исследования.

Информация о структурных переходах (фазовых, релаксационных) в полимерных материалах (ПМ) необходима для назначения технологических режимов их переработки и определения условий эксплуатации изделий. Традиционно применяемые средства термического анализа температурных характеристик структурных переходов в полимерах, как правило, требуют изготовления специальных образцов, длительного времени испытания, дорогостоящего стационарного оборудования.

Известен контактный зондовый метод [1] НК структурных переходов в ПМ по изменениям их ТФС с ростом температуры. ТФС определяют по рабочим участкам термограмм, полученных при теп-

ловом воздействии на объект исследования от круглого источника тепла постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда. По моделям плоского и сферического полупространств рассчитывают ТФС, а значение температуры перехода определяют по аномалиям ТФС на температурных зависимостях с помощью статистических критериев. Однако, измерительную информацию по модели плоского полупространства получают с помощью лишь одного термоприемника, что отрицательно сказывается на точности. По модели сферического полупространства измерительную информацию получают с помощью нескольких термоприемников. Регистрируют температурный градиент на поверхности исследуемого изделия есть существенные ограничения по времени и температуре, так как в методе [1] реализуется квазистационарная стадия.

Известно, что при распространении тепла от линейного источника постоянной мощности в цилиндрическом полупространстве нет ограничений по времени нагрева, квазистационарная стадия не реализуется, скорость нагрева, при прочих равных условиях, выше. Так как эффективность метода НК структурных переходов в ПМ зависит от скорости движения границы структурного перехода, а температурный градиент при реализации метода с распространением тепла в цилиндрическом полупространстве меньше, то применение линейного нагревателя постоянной мощности – перспективно.

Данная работа посвящена теоретическому обоснованию процесса теплопроводности от двух линейных нагревателей в полуограниченном теле.

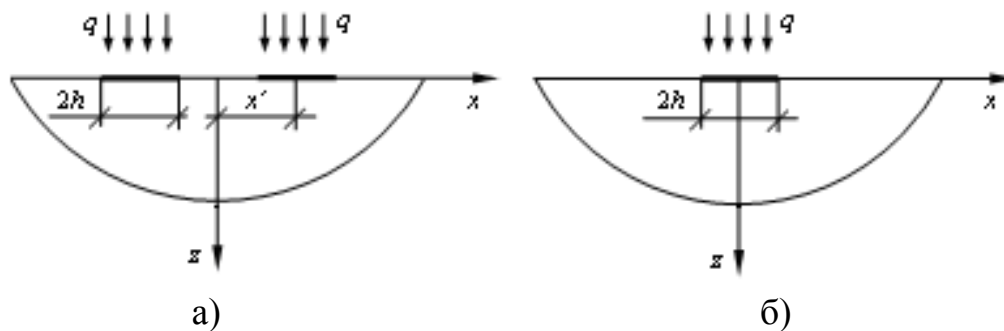


Рис. 1. Тепловые схемы метода при воздействии двух линейных нагревателей (а) и одного линейного нагревателя (б) в полуограниченном теле.

Тепловая схема, в которой применены два нагревателя (рис. 1, а), имеет ряд преимуществ по сравнению с тепловой схемой с одним нагревателем (рис. 1, б). В методе, использующем схему с двумя нагревателями, во-первых, существенно снимаются ограничения на толщину исследуемого образца; во-вторых, возможно увеличение

сигнала на термодатчике, располагающемся между нагревателями без значительного увеличения напряжения на нагревателях.

Известное решение задачи теплопроводности при распространении тепла от одного линейного источника тепла постоянной мощности имеет вид [2]:

$$T(x, 0, \tau) = \frac{qa^{0,5}\tau^{0,5}}{\pi^{0,5}\lambda} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{h+x}{2a^{0,5}\pi^{0,5}} \right] + \operatorname{erf} \left[ \frac{h-x}{2a^{0,5}\pi^{0,5}} \right] - \frac{h+x}{2\pi^{0,5}a^{0,5}\tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[ -\frac{(h+x)^2}{4a\tau} \right] - \frac{h-x}{2\pi^{0,5}a^{0,5}\tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[ -\frac{(h-x)^2}{4a\tau} \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь:  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $h$  – половина ширины полосы, м;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $q$  – плотность теплового потока, Вт/(м<sup>2</sup>);  $T(x, 0, \tau)$  – температура в точке поверхности полугограниченного тела, °С;  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата, м.

Введем следующие обозначения:

$$Fo = \frac{a\tau}{h^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{h}, \quad \Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo) = \frac{T(x, z, \tau) \cdot \lambda}{qh}, \quad \bar{z} = \frac{z}{h}, \quad \bar{x}' = \frac{x'}{h}. \quad (2) - (6)$$

Здесь  $Fo$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\Theta(\bar{x}, 0, Fo)$ ,  $\bar{x}'$  – время, координаты, температура, расстояние нагревателя относительно центра системы в безразмерном представлении.

Решение в безразмерном виде:

$$\Theta(\bar{x}, 0, Fo) = \frac{Fo^{0,5}}{\pi^{0,5}} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{1+\bar{x}}{2Fo^{0,5}} \right] + \operatorname{erf} \left[ \frac{1-\bar{x}}{2Fo^{0,5}} \right] - \frac{1+\bar{x}}{2(\pi Fo)^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[ -\frac{(1+\bar{x})^2}{4Fo} \right] - \frac{1-\bar{x}}{2(\pi Fo)^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[ -\frac{(1-\bar{x})^2}{4Fo} \right] \right\}. \quad (7)$$

Распределение тепла в полугограниченном теле от действия двух линейных нагревателей:

$$\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad \tau > 0, 0 < x < \infty, z > 0; \quad (8)$$

$$T(x, z, 0) = 0; \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial x} = \begin{cases} 0, & 0 < x < h \\ q, & x = h \\ 0, & h < x < \infty \end{cases}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(0, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (11)$$

$$T(x, z, \tau) = 0, \quad x^2 + z^2 \rightarrow \infty. \quad (12)$$

Краевая задача (8) – (12) в безразмерном виде с учетом выражений (2) – (6):

$$\frac{\partial \Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo)}{\partial \bar{z}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 < \bar{x} < \infty, \quad \bar{z} > 0 \quad (13)$$

$$\Theta(\bar{x}, \bar{z}, 0) = 0, \quad (14)$$

$$-\frac{\partial \Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo)}{\partial \bar{z}} = \begin{cases} 0, & 0 < \bar{x} < 1 \\ 1, & \bar{x} = 1 \\ 0, & 1 < \bar{x} < \infty; \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, \bar{z}, Fo)}{\partial \bar{x}} = 0; \quad (16)$$

$$\Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo) = 0, \quad \bar{x}^2 + \bar{z}^2 \rightarrow \infty. \quad (17)$$

По принципу суперпозиции решение краевой задачи (13) – (17):

$$\Theta(\bar{x}, \bar{z}, Fo) = \Theta^-(\bar{x} - \bar{x}', \bar{z}, Fo) + \Theta^+(\bar{x} + \bar{x}', \bar{z}, Fo), \quad (18)$$

где  $\Theta^-(\bar{x} - \bar{x}', \bar{z}, Fo)$  и  $\Theta^+(\bar{x} + \bar{x}', \bar{z}, Fo)$  – значение безразмерной температуры в точках поверхности, расположенных относительно начала координат слева (–) и справа (+), соответственно.

Выражения для определения  $\Theta^-(\bar{x} - \bar{x}', \bar{z}, Fo)$  и  $\Theta^+(\bar{x} + \bar{x}', \bar{z}, Fo)$  получены из решения (7).

Подставив выражения (2) – (6) в решение краевой задачи (13) – (17) после ряда преобразований определяет значение температуры поверхности  $z = 0$  в точке с координатой  $x$  от действия двух нагревателей для больших значений  $\tau$ :

$$T(x, 0, \tau) = \frac{\bar{q}_0 h}{\pi \lambda} \left\{ 2 \ln\left(\frac{a\tau}{h^2}\right) - \frac{h + (x - x')}{2h} \ln\left(\frac{h + (x - x')}{h}\right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{h + (x + x')}{2h} \ln\left(\frac{h + (x + x')}{h}\right)^2 - \frac{h - (x - x')}{2h} \ln\left(\frac{-h + (x - x')}{h}\right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{h + (-x - x')}{2h} \ln\left(\frac{h - (x + x')}{h}\right)^2 + 4 - 2\gamma + 4 \ln(2) \right\}. \quad (19)$$

Найденное решение (19) может быть использовано для нахождения теплотехнических свойств материалов исследуемых объектов, а также для решения задач оптимизации измерительного устройства при реализации метода неразрушающего определения ТФС.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий. / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова // Монография. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 288 с.

Научный руководитель: Н.П. Жуков, д.т.н., заведующий кафедрой энергообеспечение предприятий и теплотехника ТГТУ.

## **ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТАКТНЫЙ УГОЛ И СВОЙСТВА КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ, УВЕЛИЧИВАЮЩЕЙСЯ В РАЗМЕРАХ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А.С. Кравчук

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ2В

Исследования динамического поведения капли, лежащей на твердой поверхности, в настоящее время вызывают большой интерес. Однако на сегодняшний день нет полной и экспериментально проверенной теории растекания жидкости по твердой поверхности [1].

Одним из основных параметров, описывающих взаимодействие между жидкостью и твердой поверхностью, является динамический краевой угол смачивания. Динамический контактный угол рассматривается как функция свойств поверхности, по которой происходит растекание и скорости трехфазной контактной линии.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по динамике капли жидкости, растущей на твердой поверхности (подложке). Целью эксперимента является изучение влияния смачиваемости и шероховатости подложки на наступающий динамический контактный угол жидкости. Для экспериментальных исследований использовались 3 поверхности с разными статическими краевыми углами смачивания: нержавеющая сталь; шероховатые поверхности, изготовленные из нержавеющей стали.

Шероховатые поверхности получены путем бомбардировки гладкой поверхности частицами  $Al_2O_3$  размерами 10 и 100 мкм. Перед проведением эксперимента подложки в течение суток выдерживались в дистиллированной воде. Отверстие в подложке – 2 мм. В качестве смачивающей жидкости использовалась дистиллированная вода. При каждой

скорости накачки объём капли увеличивался с 0 вначале процесса до конечного объёма 0,3 мл. Скорость накачки капли варьировалась от 0,3 мл/мин до 105 мл/мин и составляла 0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 9,6; 19,2; 38,4; 76,8; 105 мл/мин. Температура воздуха в помещении составляла 23°C.

Методика проведения эксперимента. Исследуемая поверхность закрепляется на столике, после чего проводится её выравнивание относительно осей оптических систем. На пульте управления шприцевым насосом задаётся конечный объём капли и скорость её накачки. Одновременно с началом накачки капли шприцевым насосом через отверстие в подложке включаются скоростные видеокамеры. Капля удаляется с подложки и опыт повторяется. Далее проводится раскладка видеозаписей и обработка полученных кадров. По полученным данным строятся графические зависимости. Экспериментальные исследования проводились на установке, включающей теньевую и шпирен системы [2]. Камера шпирен системы используется для осуществления контроля за осесимметричностью капли. Анализ форм капли жидкости на твердой поверхности проводится при помощи теньевой методики. Оценка формы лежащей капли проводится методом Юнга-Лапласа.

По результатам обработки экспериментальных данных построены графические зависимости  $Theta (M)=f(V_k)$ ,  $Theta (M)=f(V)$ ,  $V_k=f(V)$ , где  $Theta (M)$  – средний краевой угол, °С;  $V_k$  – скорость трехфазной линии контакта, мм/с;  $V$  – объём капли, мкл;  $G$  – расход дистиллированной воды, мл/мин,  $t$  – время накачивания капли, мин.

Скорость трехфазной линии контакта рассчитывалась из следующего соотношения (1):

$$V_k = \frac{C \cdot (B_{d3} - B_{d1})}{2 \cdot (K_3 - K_1)}, \quad (1)$$

где  $C$  – скорость захвата кадров, кад/с;  $B_{d1}, B_{d3}$  – диаметр капли в предыдущий и следующий момент времени соответственно, мм;  $K_1, K_3$  – номер кадра в предыдущий и следующий момент времени соответственно.

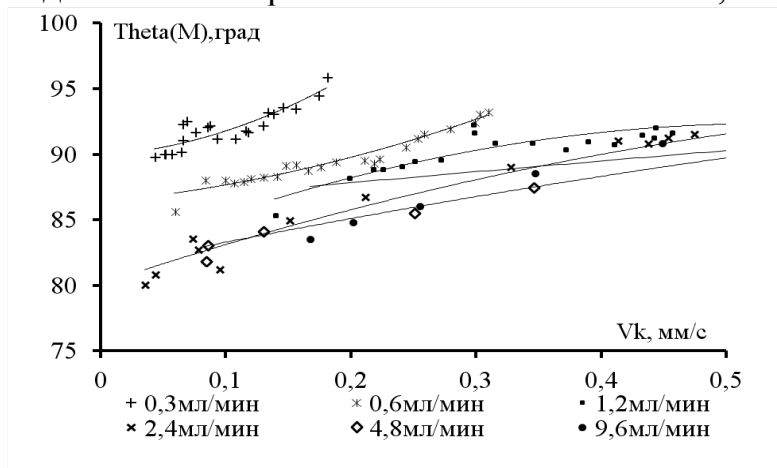
Расход дистиллированной воды (2):

$$G = \frac{C \cdot 60 \cdot (V_2 - V_1)}{(K_2 - K_1) \cdot 1000}, \quad (2)$$

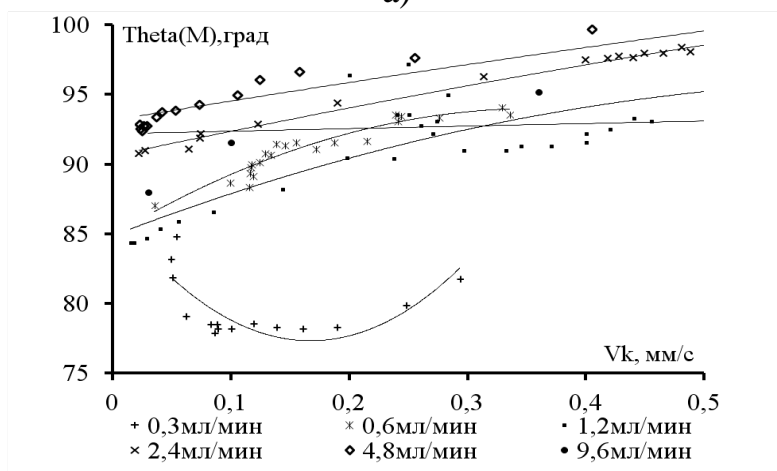
где  $V_1, V_2$  – объём капли в настоящий и предыдущий момент времени соответственно, мкл;  $K_1, K_2$  – номер кадра в предыдущий и настоящий момент времени соответственно.



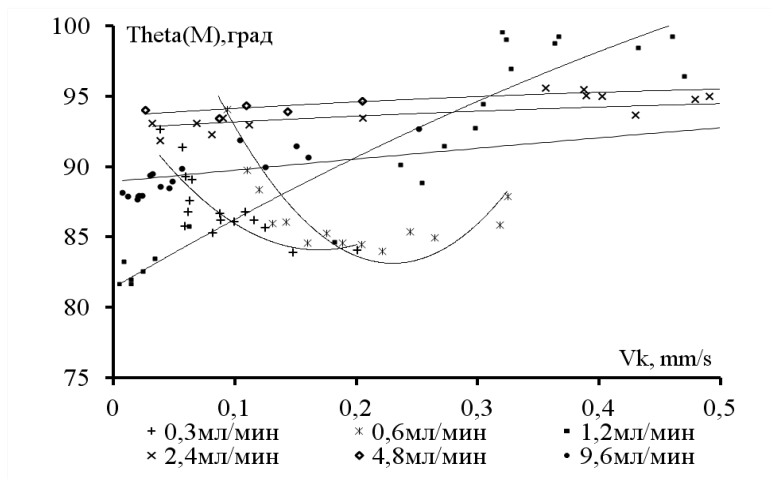
На рисунке 1а, 1б, 2в представлены графические зависимости величины динамического краевого угла от скорости линии трехфазного контакта  $\Theta(M)=f(V_k)$  при натекании дистиллированной воды на поверхности из нержавеющей стали, нержавеющей стали с шероховатостью 10мкм и нержавеющей стали с шероховатостью 100 мкм соответственно в диапазоне скорости контактной линии 0-0,5мм/с.



а)



б)



в)

Рис. 1. Изменение динамического краевого угла в зависимости от скорости контактной линии при растекании дистиллированной воды по: а) нержавеющей стали; б) нержавеющей стали с шероховатостью 10 мкм; в) нержавеющей стали с шероховатостью 100 мкм

При растекании дистиллированной воды по нержавеющей стали (рисунок 1а) наступающий краевой угол увеличивается с увеличением скорости контактной линии, причем наибольшие значения динамического краевого угла наблюдаются при наименьшей скорости накачки. Растекание дистиллированной воды по подложке из нержавеющей стали приводит к постепенному уменьшению угла натекания. Натекание происходит до тех пор, пока движущая сила больше нуля [3]. При растекании по стали с шероховатостью 10 мкм (рисунок 1б) подобной зависимости нет. Краевой угол увеличивается с увеличением скорости контактной линии до скорости накачки 4,8 мл/мин включительно. Минимальные значения динамического краевого угла наблюдаются при наименьшей скорости накачки. При натекании дистиллированной воды на сталь с шероховатостью 100 мкм (рисунок 1в) максимальное значение краевого угла достигается при скорости накачки 1,2 мл/мин. Однако последующее повышение скорости накачки (свыше 4,8 мл/мин) на шероховатых поверхностях не привело к дальнейшему увеличению краевого угла натекания. Возможно это связано с быстрым растеканием смачивающей жидкости по микроканавкам поверхности или изменением величины её поверхностного натяжения. На шероховатых поверхностях угол смачивания достигает больших значений, чем на гладкой поверхности, т.к. увеличение шероховатости приводит к увеличению краевого угла [3]. Кроме того анализ графических зависимостей растекания дистиллированной воды по поверхностям из шероховатых сталей показал, что при малых скоростях накачки значение краевого угла изменяется по параболическому закону.

Так же установлено, что с увеличением объёма капли во время накачки скорость контактной линии уменьшается. Максимальная скорость трёхфазной линии контакта наблюдается в начальный момент времени накачивания капли.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. D. Bonn. Wetting and spreading // Reviews of modern physics.– 2009.– №89.– P. 739-805.
2. D. Zaitsev. The effect of the substrate wettability and roughness on the dynamic contact // Droplets of pure and complex fluids:1st Int. Workshop on Wetting and evaporation.–Marseilles, 2013.– P. 93-95.
3. Сумм Б.Д., Горюков Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. –М.:Химия, 1976.–232 с.

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, ассистент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ХОЛОДИЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS**

А.С. Красношлыков, Г.В. Цветков, В.И. Максимов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ21

#### **Введение**

На сегодняшний день очень остро стоит вопрос по энергосбережению, ресурсоэффективности промышленных предприятий, на которых применяются теплообменные установки. Такой интерес обосновывается тем, что значительная часть теплообменных установок проектировалась во времена дешевой электроэнергии, поэтому необходимость предусмотреть меры по ее экономии является актуальной. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных проблемам теплообмена в морозильных камерах, на сегодняшний день, в основном, эти работы не позволяют оценить распределение температуры и скоростей движения жидкости и газа в исследуемом [1,2].

В представленной работе моделируются процессы теплообмена и ламинарного течения в программном пакете COMSOL Multiphysics [3] с использованием модуля non-isothermal flow.

### Основная часть

На рис.1 представлена физическая постановка задачи.

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = L;$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 = H.$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0,$$

$$0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H.$$

Модель описывалась следующими физическими параметрами:

$$L=0.11 \text{ м};$$

$$H=0.14 \text{ м};$$

$T_0=298.15 \text{ К}$  – начальная температура воздуха и воды внутри модели;

$t=120 \text{ мин}$  – время процесса.

На границах модели принимался процесс конвективного теплообмена с окружающей средой при температуре  $T_{oc}=276.15 \text{ К}$ .

Уравнения ламинарного течения и теплопроводности в жидкости и газе:

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla) \cdot u = \nabla \left[ -\rho l + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)l \right] + F \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p$$

$$F = -g * \rho$$

$$0 \leq x \leq x_1, y_1 \leq y \leq y_1 + y_2;$$

$$x_1 + x_2 \leq x \leq x_3, y_1 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3;$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3, y_1 + y_2 + y_3 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3 + y_4.$$

Уравнение теплопроводности в твердом теле:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_{trans} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4, 0 \leq y \leq y_1;$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4;$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5;$$

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad y_1 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3 + y_4;$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2, \quad y_1 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3;$$

$$x_1 \leq x \leq x_1 + x_2, \quad y_1 \leq y \leq y_1 + y_2.$$

Уравнения конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T)$$

$$h = h_{air}(L, p_A, T_{ext}) \quad (4)$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad y = 0;$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad 0 \leq y \leq y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5;$$

$$0 \leq x \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5.$$

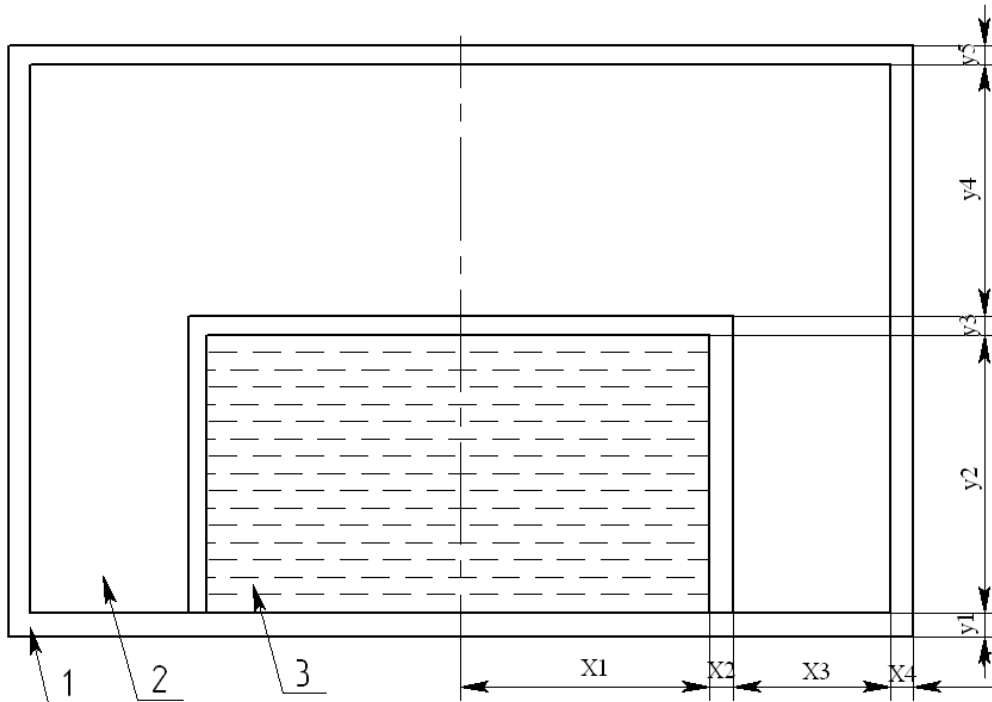


Рис. 1. Модель морозильной камеры. 1–стенки камеры, 2–воздух, 3–вода.

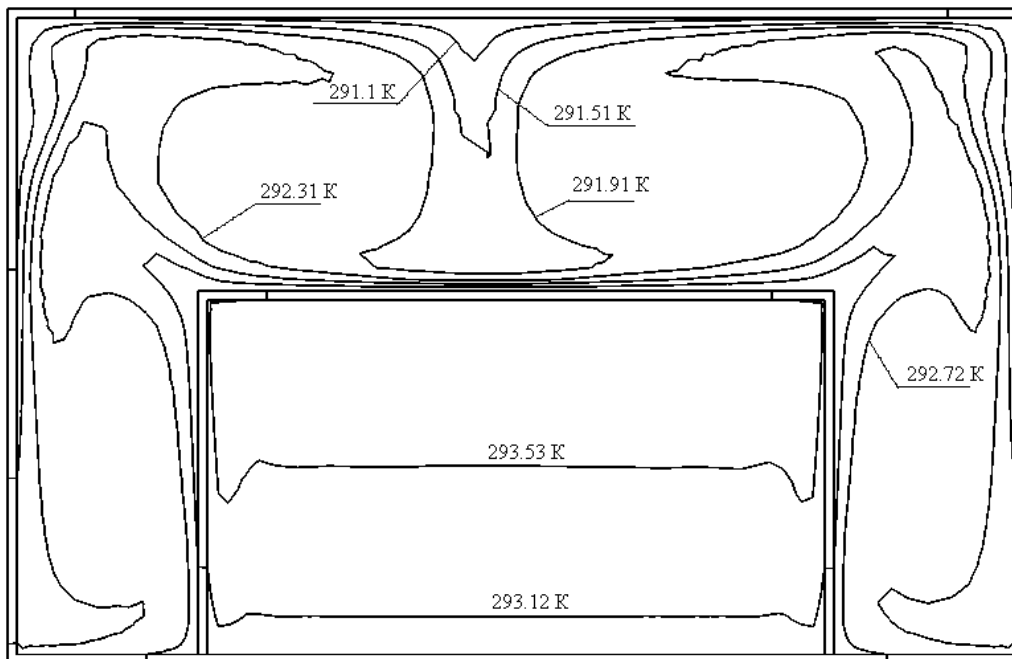


Рис. 2. Распределение температуры в морозильной камере в момент времени  $t=120$  мин, К.

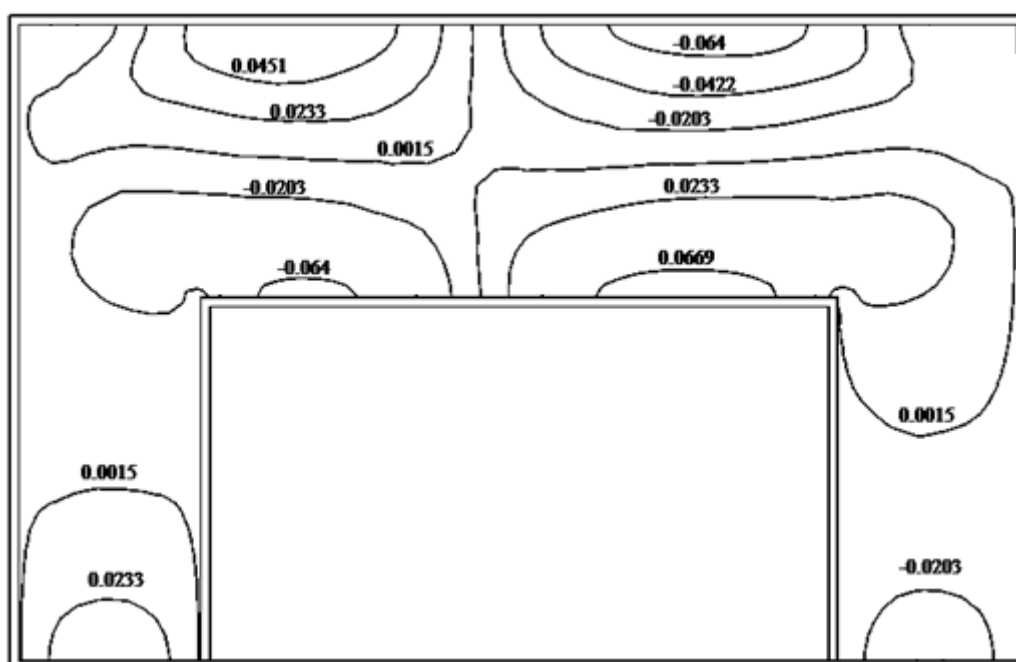


Рис. 3. Структура движения воздушных масс в исследуемой модели, м/с.

В данной работе были получены распределение температуры и поле скоростей в замкнутой прямоугольной области с оттоком тепла во внешнюю среду. В результате, можно сделать вывод, что данный программный пакет можно использовать для исследования процессов в холодильных машинах при различных тепловых нагрузках.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
2. Ударцев Е. И. Использование программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования естественной конвекции в замкнутой прямоугольной области. –Томск : Изд-во ТПУ, 2012.
3. Степанченко Т.Е. Моделирование процессов движения жидкости в трубопроводе в пакете COMSOL 3,5 MULTIPHYSICS. — Томск : Изд-во ТПУ, 2011. — 234 с.

Научный руководитель: В.И. Максимов, доцент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ С ТЕПЛОПРИТОКОМ НА ВНЕШНИХ ГРАНИЦАХ И С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОПОГЛОЩЕНИЯ**

Н.В. Демьянович, В.И. Максимов  
Томский политехнический институт  
ЭНИН, ТПТ, группа 5БМ2В

Целью данной работы является математическое моделирование естественной конвекции в прямоугольной области с теплопритоком на внешних границах и с локальным источником теплопоглощения. Геометрическая модель представлена на рисунке 1.

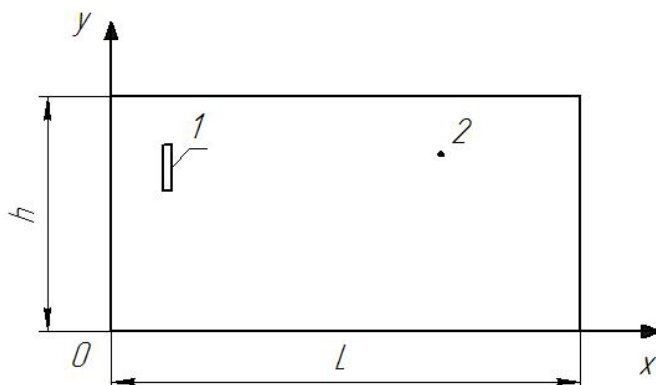


Рис. 1. Область решения задачи: 1– теплообменник-испаритель, 2–

Жидкость считается вязкой, теплопроводной, несжимаемой, режим течения ламинарным. Теплофизические свойства жидкости не зависят от температуры.

В такой постановке процесс переноса тепла в области решения описывался системой нестационарных двумерных уравнений конвекции в приближении Буссинеска для жидкости.

Безразмерные уравнения Навье-Стокса в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура» для рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{Gr}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{Gr} \cdot Pr} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = \Omega \quad (3)$$

Где  $X, Y$  – безразмерные декартовы координаты;  $\tau$  – безразмерное время;  $\Theta = \frac{T - T_0}{T_{in} - T_0}$  – безразмерная температура;  $T_0$  – температура жидкости в начальный момент жидкости;  $T_{in}$  – масштаб температуры;  $\psi$  – функция тока;  $\Psi$  – безразмерный аналог  $\psi$ ;  $\omega$  – вихрь скорости;  $\Omega$  – безразмерный аналог  $\omega$ ;  $Gr = g\beta L^3(T_{in} - T_0) / \nu^2$  – число Грасгофа;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения;  $g$  – ускорение, создаваемое массовыми силами;  $L$  – длина полости;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $Re = 2\nu L / \nu$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – скорости по оси  $y$ ;  $Pr = \nu / a$  – число Прандтля.

Начальные условия для системы (1)–(3):

$$\Psi(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Omega(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Theta(X, Y, 0) = 0.$$

Граничные условия:

– на внешнем контуре рассматриваемой области:



$$\begin{cases} Y = 0, & 0 \leq X \leq \frac{l}{L}; \\ Y = \frac{h}{L}, & 0 \leq X \leq \frac{l}{L}; \\ X = 0, & 0 \leq Y \leq \frac{h}{L}; \\ X = \frac{l}{L}, & 0 \leq Y \leq \frac{h}{L}; \end{cases}$$

задаются граничные условия второго рода  $\frac{\partial \Theta}{\partial n} = Ki$ ;

– на границах источника теплопоглощения задаются граничные условия второго рода:  $\frac{\partial \Theta}{\partial n} = -Ki$ ,

здесь  $Ki = \frac{qL}{\lambda_w(T_{in} - T_0)}$  – число Кирпичева;  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности твердой фазы;  $q$  – тепловой поток на внешних границах области решения.

Уравнения (1) – (3) решаются последовательно. Каждый временной шаг начинается с вычисления поля температуры в жидкости (2), затем решается уравнение Пуассона для функции тока (3). Далее определяются граничные условия для вектора вихря, и решается уравнение движения (1).

Для численного решения уравнений (1), (3) применяется разностная схема переменных направлений. Уравнение (2) решается с использованием схемы расщепления.

В результате численного решения задачи получены распределения гидродинамических параметров и температур, характеризующие основные закономерности рассматриваемого процесса, при различном расположении источника теплопоглощения (рис. 2–4).

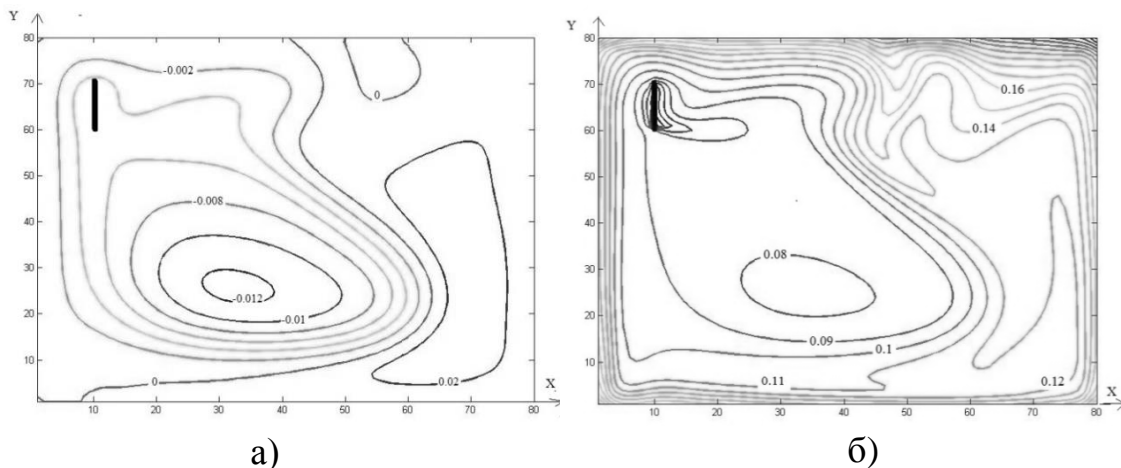


Рис. 2. а) – структура течения, б) поле температур для модели естественной конвекции. Источник теплопоглощения располагается слева в верхней части полости ( $Pr=7,1$ ,  $Gr=10^7$ ).

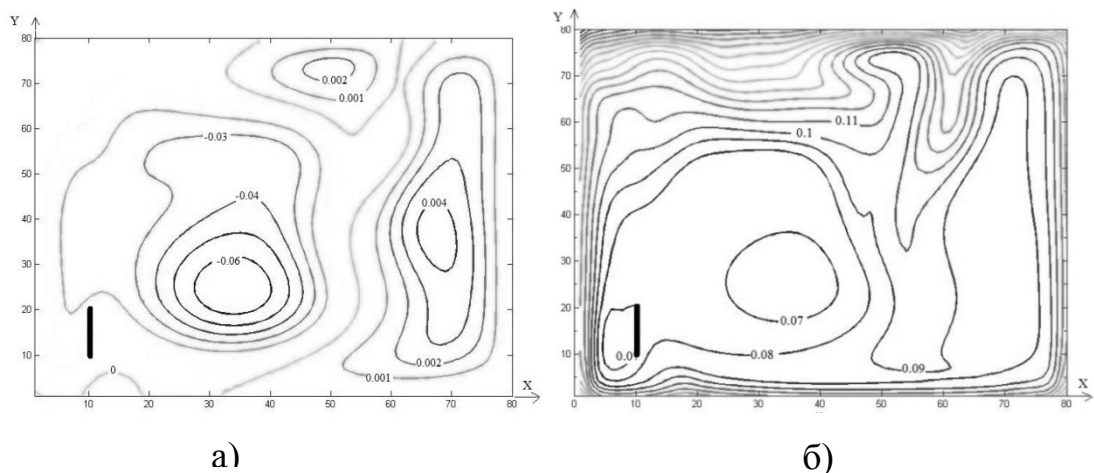


Рис. 3. а) – структура течения, б) – поле температур для модели естественной конвекции. Источник теплопоглощения располагается слева в нижней части полости ( $Pr=7,1$ ,  $Gr=10^7$ ).

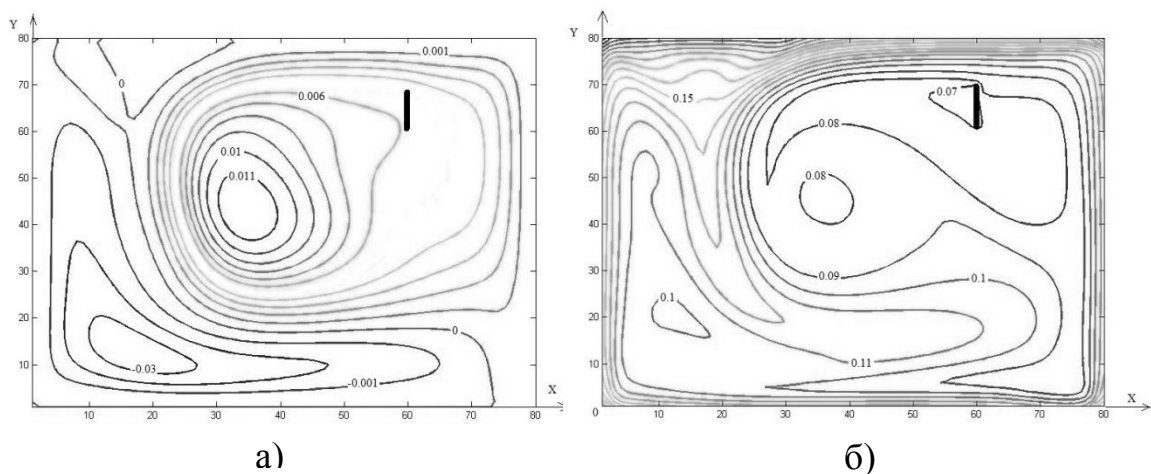


Рис. 4. а) – структура течения, б) – поле температур для модели естественной конвекции. Источник теплопоглощения располагается справа в верхней части полости ( $Pr=7,1$ ,  $Gr=10^7$ ).

Математически смоделирована естественная конвекция в замкнутой прямоугольной области с теплопритоком на внешних границах и с локальным источником теплопоглощения. Установлено, что изменение расположения источника теплопоглощения приводит к существенному изменению структуры течений и распределения температуры по всей рассматриваемой области. Полученные результаты являются основанием для вывода о необходимости применения математического моделирования при расчете тепловых режимов естественных водоемов, которые используются в качестве тепловой нагрузки на испарительный теплообменник теплонасосных установок.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания <Наука> (Шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Максимов В. И. Смешанная конвекция вязкой несжимаемой жидкости в водоемах-охладителях ТЭЦ: Диссертация канд. техн. наук – Томск, 2006. – 110 с.
2. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло – и массообмена // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 288 с.
3. Крылов Э. Г. Парокомпрессионные Тепловые насосы // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – №68(04).–С. 173–180.

Научный руководитель: В. И. Максимов, к.т.н., доцент, ТПТ ЭНИН ТПУ.

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Е.В. Пудовкина

Тамбовский государственный технический университет

Неразрушающий контроль (НК) характеристик качества многослойных материалов (и изделий из них) актуален. Новые методы и средства контроля соотношений толщин слоев, сплошности соединений, наличия различных включений востребованы. Определение теплофизических свойств (ТФС) отдельных слоев и конструкции в целом активными методами теплового контроля перспективно.

Среди тепловых методов, предназначенных для решения указанных проблем, определенный интерес представляют неразрушающие методы теплового контроля с использованием плоского источника тепла постоянной мощности, встроенного в подложку измерительного зонда [1 – 3]. Достоинства данных методов: сравнительная простота реализации; малое время, необходимое для проведения эксперимента. Исследования в этой области на сегодняшний день являются актуальными. Это определяется тем, что ТФС материалов находят на основании косвенных экспериментов и рассчитывают по определенным математическим моделям. В результате точность контроля во многом обуславливаются тем, насколько верно математическая модель описывает тепловые процессы, проходящие при измерении [4].

Цель работы состоит в разработке измерительной системы для неразрушающего теплового контроля ТФС и толщины полимерных покрытий металлических изделий.

Были решены следующие задачи: выбрана измерительная схема метода теплового НК с круглым плоским источником тепла постоянной мощности; сформулирована и решена краевая задача теплопроводности, применительно к двухслойной системе: полимерное покрытие – металл; исследована математическая модель метода, позволяющая определять толщину слоя покрытия и ТФС по температурным откликам на тепловое воздействие от источника тепла, действующего на поверхности двухслойного тела; разработана методика и определены оптимальные условия НК двухслойных материалов; разработана и реализована в аппаратном исполнении измерительная система НК.

В случае НК объектов активными тепловыми методами теплофизические свойства (ТФС) проявляются через температурный отклик исследуемого образца на тепловое воздействие, которому подвергается образец (или изделие) в специально организованном эксперименте [5].

Структурная схема измерительной системы (ИС) представлена на рис.1.

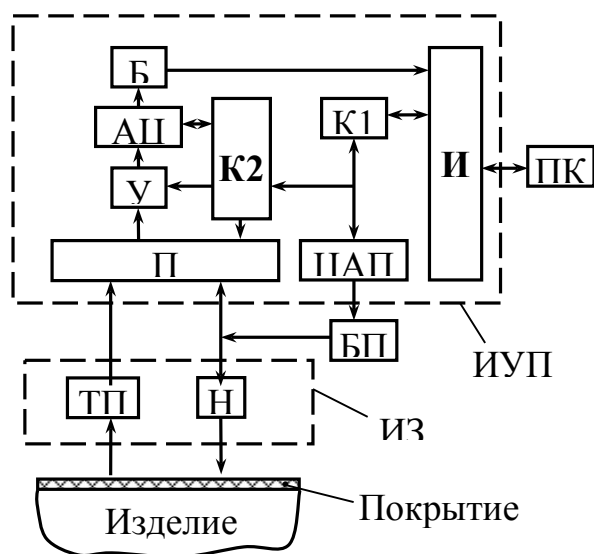


Рис. 1. Структурная схема ИС

ИС состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы, измерительного зонда (ИЗ), регулируемого блока питания (БП). Зонд обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие с помощью нагревателя (Н), температура в заданной точке контроля фиксируется термоэлектрическим преобразователем (ТП). В качестве ТП используется дифференциальная термопара, горячий спай которой устанавливается в плоскости контакта

ИЗ с исследуемым объектом. Холодный спай ТП установлен на подложке ИЗ. Мощность и длительность теплового воздействия встроенного в подложку ИЗ нагревателя Н задаются программно через интерфейс (И), контроллер К1, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и блок питания (БП).

Сигналы с ТП и блока питания поступают через мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс (И) в ПК. Сбор информации производится при нагреве исследуемого тела. ИС реализует алгоритмы управления режимами эксперимента, определения ТФС или толщины покрытий.

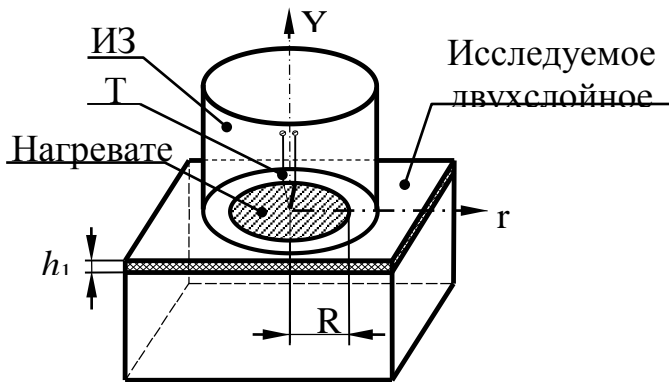


Рис. 2. Измерительная схема

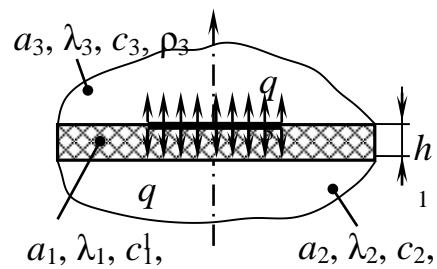


Рис. 3. Тепловая схема

Тепловое воздействие на исследуемое тело с равномерным начальным температурным распределением осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде диска радиусом  $R$ , встроенного в подложку ИЗ (рис. 2). Подложка ИЗ изготовлена из теплоизолятора с ТФС: температуропроводностью  $a_3$ , теплопроводностью  $\lambda_3$ , теплоемкостью  $c_3$ , плотностью  $\rho_3$ . Исследуемое тело представляет собой конструкцию, состоящую из двух слоев: первый – низкотеплопроводный с ТФС: температуропроводностью  $a_1$ , теплопроводностью  $\lambda_1$ , теплоемкостью  $c_1$ , плотностью  $\rho_1$ ; второй – высокотеплопроводный с теплофизическими свойствами: температуропроводностью  $a_2$ , теплопроводностью  $\lambda_2$ , теплоемкостью  $c_2$ , плотностью  $\rho_2$ . Толщина слоя –  $h_1$ . Температура в точке контроля измеряется с помощью ТП.

Математическая модель теплопереноса от плоского круглого источника тепла постоянной мощности для данного двухслойной системы получена в результате решения краевой задачи теплопроводности [6]:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}, \quad (1)$$

где выражение (1) представляет собой линейную зависимость вида:

$$T(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0, \quad (2)$$

где  $b_1 = \frac{2q}{\sqrt{\pi \varepsilon_2}}$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – значения тепловой активности материалов

покрытия и металлической подложки.

Так как объект исследования – двухслойное тело, первый слой которого низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный, то  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  и  $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$ .

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \cdot \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1} \approx \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что  $h_1 = \frac{\lambda_1 \cdot b_0}{q}$ . (4)

Из выражения (4) можно определить толщину первого слоя  $h_1$ . Если известна толщина покрытия  $h_1$ , то можно определить ТФС или выявить наличие дефекта покрытия по температурному отклику.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: учебное пособие // С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 112 с.
2. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 288 с.
3. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Пудовкина Е.В. Многомодельный метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. № 1. – С. 188 – 194.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Теплофизические измерения и приборы // Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

6. Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Пудовкина Е.В., Антонов А.О. Моделирование теплопереноса при теплофизических измерениях // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – С. 54 – 57.

Научный руководитель: Н.Ф. Майникова, д.т.н., профессор кафедры энергообеспечение предприятий и теплотехника Тамбовский государственный технический университет.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ТРАВЯНОЙ ВЕТОШИ ОДИНОЧНОЙ НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ**

Д.С. Осотова, А.В. Захаревич  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5Б1Б

### **ВВЕДЕНИЕ**

Уже несколько десятилетий подряд наша страна встречается с большой бедой - палами прошлогодней сухой травы, часто переходящими на леса, торфяники, линии электропередачи, дачные поселки и населенные пункты. На лесопокрытых территориях расположены различные промышленные производства, в том числе потенциально пожароопасные [1,2]. При их функционировании возможно формирование нагретых до высоких температур частиц металлов и неметаллов [3]. В случае расположения промышленного объекта на лесопокрытой территории возможно выпадение таких частиц на слой лесного горючего материала (ЛГМ) и возникновение лесного пожара или пожара на границе «промышленный объект-лесной массив» [4]. Лесные пожары относятся к категории чрезвычайных ситуаций и по этому изучение процессов их возникновения и протекания продолжает оставаться актуальной задачей.

Целью работы является экспериментальное исследование условий и характеристик зажигания при локальном нагреве слоя лесного горючего материала на примере травяной ветоши.

### **ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследований являлись навески, сформированные из типичного ЛГМ – травяной ветоши. Слои моделировались хаотичной

укладкой на подложке. Плотность укладки соответствовала реальным природным условиям. Непосредственно перед проведением опытов образцы травяной ветоши высушивались в сушильном шкафу до полного испарения влаги из материала.

В эксперименте рассматривается сценарий катастрофической лесной пожарной опасности, когда влага в ЛГМ отсутствует. Использовалась экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1.

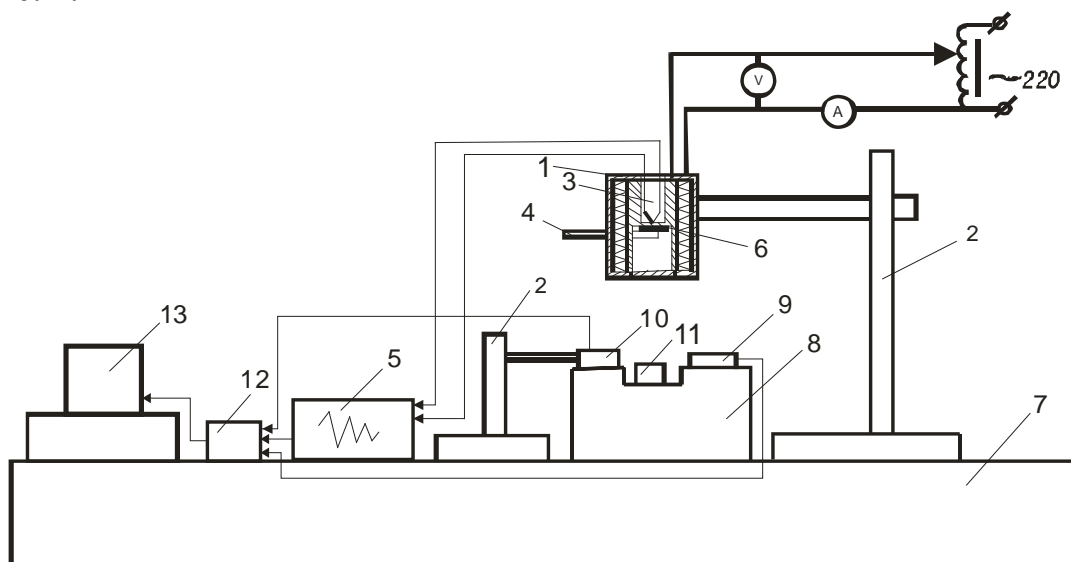


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки : 1-нагревательный прибор, 2-штатив, 3-хромель-алюмелевая термопара, 4-керамический стержень, 5-устройство контроля температуры УКТ38-Щ4-ТП, 6-металлическая частица, 7-рабочая поверхность экспериментальной установки, 8-огнестойкая площадка,9-приемник излучения и регистратор пламени, 10-излучатель,11-вертикальный стеклянный цилиндрический сосуд, 12-аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 13- персональный компьютер.

Эксперименты проводились со стальными частицами в форме цилиндров размерами (диаметр  $d_p$  и высота  $h_p$ ): а)  $h_p = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_p = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м; б)  $h_p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_p = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м. Проведенные при отработке методики экспериментальных исследований постановочные опыты показали, что частицы с меньшими характерными размерами даже при нагреве до высоких температур не инициируют загорания исследуемого лесного горючего материала. Температура частицы ( $T_p$ ) существенно превышала начальную температуру ЛГМ. Для обеспечения достоверности результатов измерений опыты проводились 5 – 6 раз подряд в одинаковых условиях. Для математической обработки результатов эксперимента была использована следующая методика [5]. Рассчитывались средние значения времени задержки загорания тра-



вяной ветоши нагретой частицей для каждой фиксированной начальной температуры источника нагрева. Затем производился расчет среднеквадратичного отклонения и доверительного интервала с помощью коэффициентов Стьюдента.

Нагрев металлического диска до заданной температуры осуществлялся в нагревательной печи, обеспечивающей стабильную температуру рабочего объема (до 1523 К) в течение продолжительного времени. Нагретая частица падала с фиксированной высоты 0,15 м на слой лесного горючего материала. Моменты соприкосновения горячей стальной частицы с поверхностью ЛГМ и появления пламени фиксировались цифровой видеокамерой. Время задержки зажигания  $\tau_{ind}$  определялось от момента контакта частицы с поверхностью исследуемого образца до момента появления пламени. Систематическая погрешность измерения начальной температуры частицы, оцениваемая по методике [6], не превышала 2 %. Погрешность измерения времени составляла  $\pm 25\%$  и определялась возможностью видеокамеры.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости времени задержки зажигания ( $\tau_{ind}$ ) травяной ветоши от начальной температуры частицы ( $T_p$ ). Кривые построены в результате аппроксимации экспериментальных данных. Аппроксимационные кривые получены методом наименьших квадратов.



Рис. 2. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания травяной ветоши от начальной температуры частицы: 1 –  $h_p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_p = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м; 2 –  $h_p = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_p = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м

Левое предельное значение температуры на каждом рисунке соответствует минимальному значению температуры частицы, при котором происходило зажигание исследуемого материала. При дальнейшем снижении температуры частицы зажигание ЛГМ не происходило. В результате анализа визуальных наблюдений и видеogramм установлены следующие закономерности процесса зажигания. Источник нагрева выпадает на поверхность листовой пластины. В течение короткого периода происходит инертный прогрев слоя ЛГМ, за которым следует термическое разложение материала с выделением газообразных продуктов пиролиза. В микропористой среде ЛГМ происходит транспорт газообразных продуктов пиролиза к нагреваемой поверхности слоя и их смешивание с окислителем. Затем происходит нагрев газовой смеси с последующей стадией зажигания.

#### ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные зависимости времени задержки зажигания ЛГМ от начальной температуры «горячей» одиночной частицы. В ходе опыта определены минимальные температуры, при которых ещё происходило возгорание травянистого растения. Установлено, что время задержки обратно пропорционально начальной температуре частицы. Сравнение экспериментальных прямых показывает, что увеличение размеров частицы увеличивает время задержки зажигания на 30%. С увеличением площади поверхности источника нагрева критическая температура уменьшается. Полученные закономерности могут быть использованы для создания обобщенной теории зажигания ЛГМ локальными источниками энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Приказ МЧС России от 4.11.2004 г. № 506 «Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта». Зарегистрирован в Минюсте РФ 22 декабря 2004 г. № 6218.
2. Приказ МЧС России от 28.02.2003 г. № 105 «Об утверждении требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения».
3. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Нагретые до высоких температур частицы металла как источники локальных возгораний жидких веществ // Пожарная безопасность. - 2008. - № 4. - С. 72-76.

4. Барановский Н.В. Модель для оценки пожарной безопасности населенного пункта при лесных пожарах // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал.- 2010.- № 5.- С. 8. URL:<http://ipb.mos.ru/ttb>(дата обращения 24.02.12).
5. Гурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М. : Высш. Шк., 2003.- 479 с.
6. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей / А.В. Захаревич [и др.] // Физика горения и взрыва.- 2008.- Т. 44.- № 5.- С. 10-15.

Научный руководитель: А.В. Захаревич, к.ф.-м.н., доцент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН ПРЕКРАЩЕНИЯ РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ «ВОДЯНОГО СНАРЯДА»**

А.О. Жданова  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП

Лесные пожары являются мощным природным и антропогенным фактором, существенно изменяющим функционирование и состояние лесов. Лесные пожары наносят урон экологии, экономике, а часто и человеческие жизни оказываются под угрозой. Для стран, где леса занимают большую территорию, лесные пожары являются национальной проблемой.

На территории лесного фонда России ежегодно регистрируется от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 0,5 до 2,5 млн. га. С учетом горимости огромного количества лесов на не охраняемых и эпизодически охраняемых территориях северных районов Сибири и Дальнего Востока общая величина пройденной огнем площади составляет от 2,0 до 5,5 млн. га.

Направления развития технологий тушения крупных лесных и городских пожаров с применением авиации довольно часто связывают со специальным распылением тушащих, как правило, жидкостных смесей в зоне горения [1–3]. Большая часть сбрасываемой жидкости проходит через пламя с минимальным изменением массы при испарении.

Наиболее эффективным и распространенным средством тушения лесных пожаров является вода. Она может применяться для тушения низовых, верховых (устойчивых) и почвенных (подстилочных и торфяных) лесных пожаров, причем, в зависимости от вида пожара, условий, в которых он распространяется, наличия воды и вида используемых механизмов применением этого способа могут решаться задачи как локализации, так и полного его тушения.

В условиях типичного лесного пожара полная ликвидация очага горения [6, 7] возможна только при замедлении реакции термического разложения в приповерхностных слоях лесных горючих материалов (ЛГМ). Важно установить предельные температуры в следе «снаряда», при которых обеспечиваются условия замедления реакции термического разложения в приповерхностном слое типичного лесного горючего материала .

Целью настоящей работы является численный анализ предельных температур в следе типичного «водяного снаряда», при которых обеспечиваются условия замедления реакции термического разложения в приповерхностном слое ЛГМ. В качестве типичного ЛГМ рассматривался фрагмент хвои.

Для рассматриваемой задачи теплопереноса предполагалось, что «водяной снаряд» полностью испарился при движении через пламя и над поверхностью горящего типичного лесного горючего материала сформировалась смесь водяных паров и продуктов сгорания с некоторой температурой  $T_m$ .

В начальный момент времени в приповерхностном слое ЛГМ задавалось распределение температуры, соответствующее условиям реального пожара [6, 7].

Считалось, что при контакте ЛГМ с внешней газовой средой происходит интенсивный теплоотвод из зоны пиролиза. При моделировании фиксировалось время поддержания  $T_m$ , при котором температура в приповерхностном слое ЛГМ становится меньше температуры начала термического разложения  $T_d$ . Это время считалось временем замедления реакции термического разложения ЛГМ  $t_d$ .

Одной из основных задач являлось определение температуры внешней парогазовой среды  $T_m$ , при которой обеспечивались условия замедления реакции термического разложения ЛГМ. При этом вычислялось время, достаточное для останова химического реагирования в приповерхностном слое ЛГМ ( $t_d$ ) – снижения температуры ниже  $T_d$ .

На рисунке 1 представлена полученная в результате проведения численных исследований поверхность, характеризующая зависимости времени  $t_d$  от  $T_m$  при различных толщинах приповерхностного слоя

ЛГМ ( $L_f$ ). Представленная поверхность  $t_d=f(T_m, L_f)$  позволяет выделить условия останова термического разложения ЛГМ. Так, значения параметров  $T_m$  и  $L_f$ , соответствующие временам  $t_d$ , лежащим на этой поверхности или ниже ее, характеризуют условия замедления реакции разложения ЛГМ, ликвидации очага горения. При временах  $t_d$  выше представленной поверхности химическое реагирование в приповерхностном слое ЛГМ несколько замедляется при контакте с парогазовой средой с некоторой температурой  $T_m$ , а затем снова ускоряется.

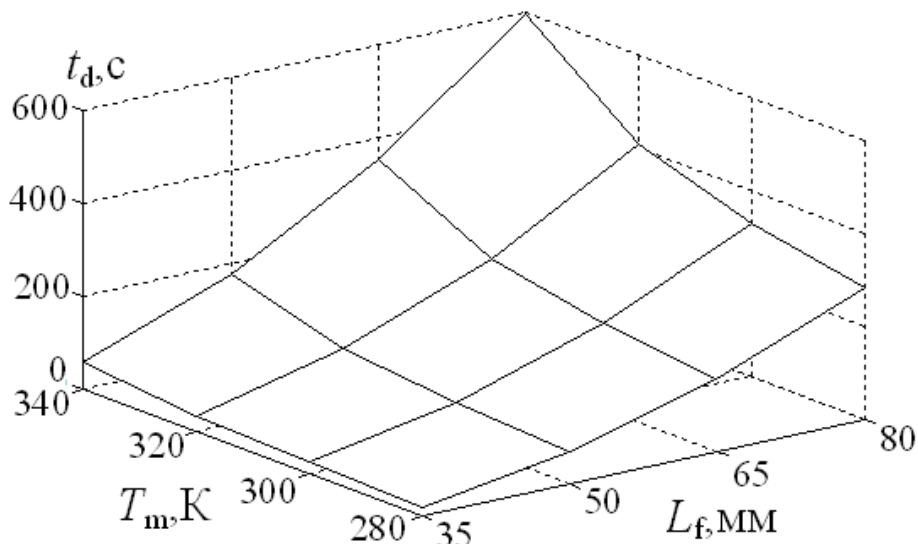


Рис. 1. Времена замедления реакции термического разложения ЛГМ в зависимости от толщины его приповерхностного слоя и температуры смеси продуктов сгорания и водяных паров

Использование большого объема тушащего вещества при тушении пожаров с летательных аппаратов зачастую необоснованно. В последние годы тонкораспыленная вода рассматривается как один из самых перспективных флегматизаторов горения [8].

Одним из возможных вариантов определения необходимого объема сбрасываемого тушащего вещества является определение толщины пленки жидкости, достаточной для прекращения реакции термического разложения в приповерхностном слое ЛГМ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Wighus R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge // Proceedings of the international water mist conference, Vienna. 2001. P. 1–26.
2. Горшков В.С., Москвиллин Е.А., Хасанов И.Р. Оценка параметров тушения лесных пожаров авиационными средствами

- // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников. – М.: ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2001.– С. 34–35.
3. Ковалев А.Н., Журавлева Л.А. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров // Научная жизнь. 2012. № 4. С. 153–157.
  4. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе// Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 9–17.
  5. Стрижак П.А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 4. – С. 839–848.
  6. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров. М.: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.
  7. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 301 с.
  8. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. –Т.20,№ 11. –С.53-55.

Научный руководитель: П. А. Стрижак, д.ф-м.н., заместитель проректора-директора ЭНИН по научной работе, профессор кафедры АТП ЭНИН, научный руководитель лаборатории ЛМПТ ЭНИН.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ОДИНОЧНОЙ НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ**

А.С. Наумкин, А.В. Захаревич  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5Б1Б

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вопрос о противопожарной безопасности в промышленности, в настоящее время, весьма актуален[1]. На предприятиях, связанных с деревообработкой, в большом количестве содержится древесная стружка. Существует большая вероятность зажигания древесины из-за попадания на нее «горящей» частицы, вследствие чего может возникнуть пожар[2]. Так же древесина используется в качестве топлива в

различных котельных установках, как в промышленных масштабах, так и в устройствах для обогрева индивидуальных строений. Поэтому исследование зажигания твердого топлива в виде диспергированной древесины является актуальным в настоящее время.

Цель работы – экспериментальное исследование условий и характеристик зажигания диспергированной древесины одиночной “горячей” металлической частицей.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе планирования эксперимента выбрана наиболее вероятная схема – частица падает перпендикулярно на небольшое количество измельченного твердого топлива. Схема экспериментальной установки используемой в данном исследовании представлена на рисунке 1. Эксперименты проводились для двух металлических частиц в форме цилиндра. Размеры первой частицы: высота  $h = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м, диаметр  $d = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м в дальнейшем ее будем называть “большая частица”. Размеры второй частицы: высота  $h = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м, диаметр  $d = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м в дальнейшем ее будем называть “маленькая частица”. Температура частицы ( $T_p$ ) существенно превышала начальную температуру твердого топлива. Твердое топливо в виде мелко измельченной березы. Для обеспечения достоверности результатов измерений опыты проводились 4 – 5 раз подряд в одинаковых условиях [3]. В ходе проведения исследования определена случайная погрешность по формуле (1):

$$\Delta X_{сл} = t_{an} \cdot \sigma_x, \quad (1)$$

где  $t_{an}$  - коэффициент Стьюдента, который зависит от числа измерений  $n$  и от доверительной вероятности  $a$  (в данном исследовании  $a = 0,95$ ),  $\sigma_x$  – среднеквадратичная погрешность среднего арифметического значения измеренной величины. Значение коэффициента Стьюдента зависит от числа измерений. При  $n = 4$   $t_{an} = 3,18$ , при  $n = 5$   $t_{an} = 2,78$ . Случайная погрешность, для проведенных экспериментов, составила от 0,03с до 0,07с. Относительная погрешность измерений не превысила 29%.

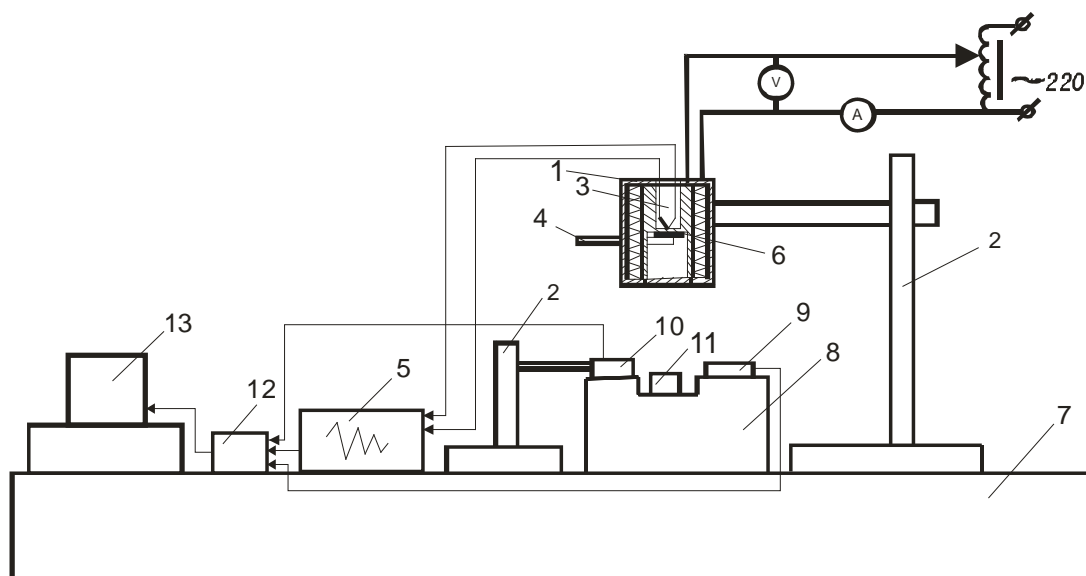


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки :  
 1-нагревательный прибор, 2-штатив, 3-хромель-алюмелевая термопара, 4-керамический стержень, 5-устройство контроля температуры УКТ38-Щ4-ТП, 6-металлическая частица, 7-рабочая поверхность экспериментальной установки, 8-огнестойкая площадка, 9-приемник излучения и регистратор пламени, 10-излучатель, 11-вертикальный стеклянный цилиндрический сосуд, 12-аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 13- персональный компьютер.

Нагрев металлической частицы до заданной температуры осуществлялся в нагревательном приборе со встроенной термопарой. Нагретая частица падала на твердое топливо с фиксированной высотой 0,15 м. Время задержки зажигания ( $\tau_{ind}$ ) определялось от момента контакта частицы с поверхностью твердого топлива до момента появления пламени. Интервал между этими двумя моментами регистрировался видеокамерой, которая обеспечивала возможность детализации исследуемых механизмов и выделения достаточно тонких эффектов при многократном повторном анализе видеок кадров [3].

В ходе проведения исследования обеспечивалась неизменность внешних условий. Температура окружающей среды поддерживалась постоянной 293...295К. Относительная влажность воздуха окружающей среды 84%. Так же поддерживалась постоянной начальная температура твердого топлива.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По завершению экспериментальных исследований построена зависимость времени задержки зажигания  $\tau_{ind}$  от начальной температуры частицы  $T_p$ , при воспламенении древесного топлива «большой» стальной частицей. Кривая получена в результате аппроксимации экспериментальных данных. Эта кривая представлена на рисунке 2. Для



большой частицы левое значение температуры соответствует минимальному значению температуры частицы  $T_p$ , при котором еще происходило зажигание топлива. При дальнейшем снижении температуры частицы зажигание топлива не происходило. При увеличении температуры время задержки  $\tau_{ind}$  уменьшалось.

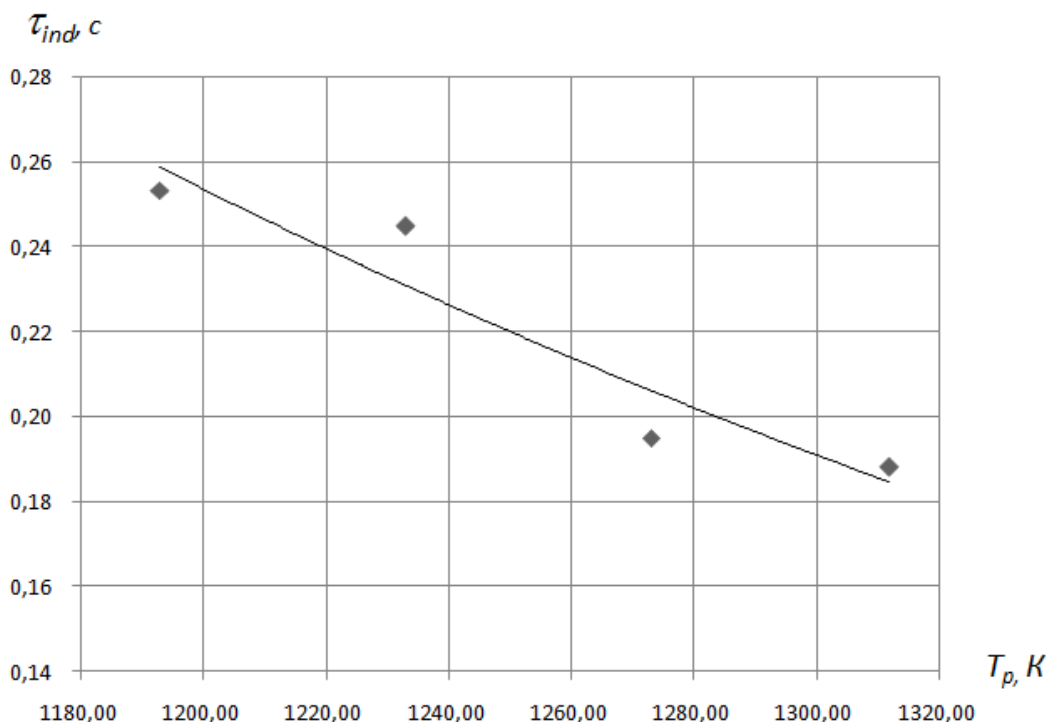


Рис. 2. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания диспергированной древесины от начальной температуры частицы.

При проведении эксперимента с «маленькой» частицей и с этим же топливом, зажигание происходило только при температуре больше 1310К. Время задержки  $\tau_{ind}$  при этой температуре в среднем равнялось 0,2 секунды.

#### ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано зажигание диспергированной древесины одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей. Определено минимальное значение температуры при котором диспергированная древесина еще зажигается от частицы в виде цилиндра с размерами  $h = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м,  $d = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м. Также выявлено значение минимальной температуры частицы в виде цилиндра с размерами  $h = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м,  $d = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м для этого же топлива, при котором твердое топливо еще зажигается. Это значение составляет 1310К. Установлено, что время задержки обратно пропорционально начальной температуре частицы. На время задержки влияют размеры «горя-

чей” частицы. С увеличением площади поверхности частицы, вступающей в контакт с топливом, критическая температура уменьшается.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Статистика пожаров в Российской Федерации за 7 месяцев 2006 г. // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. Т.15. – №5. – С.68.
2. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – №. 1. – С. 78-85.
3. Захаревич А. В., Кузнецов Г. В., Максимов В. И., Панин В. Ф., Равдин Д. С. Оценка пожарной опасности мазута в условиях перегрузки, хранения и транспорта на тепловых электрических станциях // Известия ТПУ. 2008. №4.

Научный руководитель: А.В. Захаревич, к.ф.-м.н., доцент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

М.В. Пискунов, Д.М. Лазарев, В.Ю. Половников  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ21

#### Введение

Тепловая изоляция криогенных трубопроводов, по которым транспортируется сжиженный природный газ при температуре  $\square -160$  °С, эксплуатируется в тяжелых условиях, и прежде всего это непрерывное изменение температуры и влажности наружного воздуха.

Стоит отметить, что в настоящее время не существуют модели и методики анализа тепловых режимов работы тепловой защиты криогенных систем, описывающие реальные физические процессы, протекающие в пористой структуре низкотемпературной изоляции и механизмы взаимодействия с окружающей средой [1], не говоря уже о периодичности эксплуатации криогенных сооружений. Таким образом, разработка подходов к анализу тепловых режимов и оценке теплопритоков к криогенным сооружениям различного назначения приобретает особую актуальность.

Целью данной работы является численное исследование температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей и анализ возможности разрушения изоляции.

#### Постановка задачи

Рассматривается участок трубопровода для транспортировки криожидкостей. Для тепловой изоляции трубопровода совместно решаются одномерные нестационарные задачи теплопроводности и термоупругости.

Внешний контур изоляции трубопровода контактирует с окружающей средой. Для задачи теплопроводности на внутренней и внешней границах слоя тепловой изоляции вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно. В начальный момент времени температура равна постоянной величине. Предполагается, что температура внутренней поверхности изоляции равна температуре холодной жидкости и что в результате охлаждения изоляции в ней возникают температурные напряжения.

#### Математическая модель

Математическая постановка задачи описывается следующими уравнениями [1, 2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{xx} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{yy} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{yy} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{zz} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{xy} = 2\mu \varepsilon_{xy}; \\ \sigma_{yz} = 2\mu \varepsilon_{yz}; \\ \sigma_{zx} = 2\mu \varepsilon_{zx}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma(x, \tau) = \frac{\alpha_p \cdot E}{1 - \nu} \left[ \frac{1}{\delta} \int_0^\delta T(x, \tau) dx - T(x, \tau) \right]. \quad (3)$$

Начальные условия:

$$T = T_{нач} = const, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad \tau = 0; \quad (4)$$

Граничные условия:

$$r = R_1, T = T_{v1} = const, \tau > 0; \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_{oc}), \quad r = R_2, \quad \tau > 0; \quad (6)$$

Обозначения:  $R$  – граница области расчета;  $T$  – температура, К;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  – время, с;  $r$  – координата, м;  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\sigma$  – компонент напряжения;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга, Мпа;  $\lambda$  и  $\mu$  – постоянные Ляме;  $\varepsilon$  – компонент деформации;  $e$  – объемная деформация,  $\alpha_p$  – коэффициент линейного температурного расширения,  $\text{К}^{-1}$ .

Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(6) решена методом прогонки по неявной разностной схеме и методом Симпсона [2].

В качестве примера рассматривался типичный участок трубопровода для транспортировки сжиженного углеводородного газа – диаметром 400 мм [3]. В качестве изоляционного материала выбраны минеральная вата и пенополиуретан ППУ-104Б толщиной 280 мм. Температура внутренней границы  $R_1$  равна температуре криожидкости в резервуаре  $T_{\text{ж}} = 111 \text{ К}$  [4]. Температура окружающей среды  $T_{\text{ос}} = 293 \text{ К}$ . Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности изоляции принимался равным  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Время расчета задавалось равным  $\tau = 3 \cdot 10^5 \text{ с}$ .

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик [3 – 6] веществ и материалов, использовавшихся при проведении численного моделирования.

Таблица 1. Теплофизические характеристики изоляционных материалов

Характеристика	$k$ , Вт/(м·К)	$c$ , Кдж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha_p$ $\cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	$E$ , Мпа	$\mu$	$\sigma$ , Мпа
Пенополиуретан	0,0397	0,46-0,8	390	66-71	1,15	0,33	1,4
Минеральная вата	0,047	0,88	130	7,7	0,15-0,25	0,17	0,01-0,04

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного моделирования температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей приведены на рисунках 1 и 2.

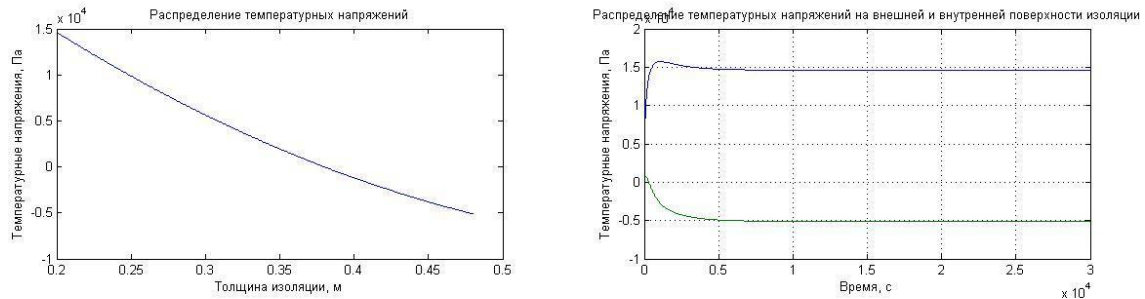


Рис. 1. Результаты моделирования для пенополиуретана.

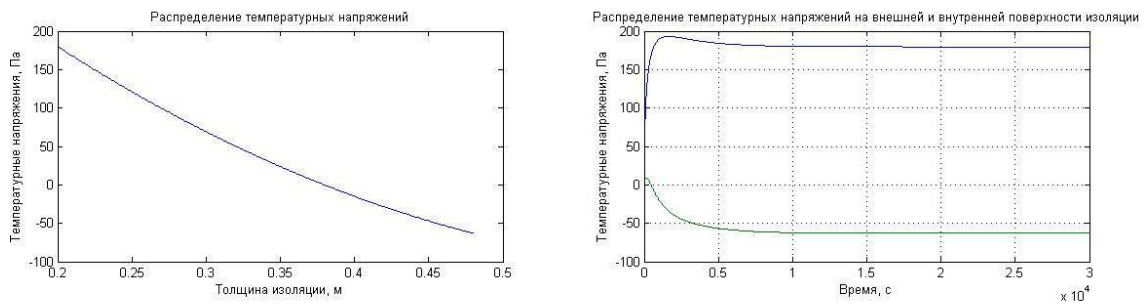


Рис. 2. Результаты моделирования для минеральной ваты.

Сопоставление теплофизических характеристик используемых изоляционных материалов (таблица) с полученными в результате моделирования данными (рисунки 1, 2) позволяет сделать вывод о том, что при данных начальных условиях, значения температурных напряжений не превышают табличных (как для пенополиуретана, так и для минеральной ваты). Исходя из физико-механических, физико-химических и термоупругих свойств пенополиуретана, результат моделирования достаточно закономерен, что нельзя сказать про результат моделирования температурных напряжений для минеральной ваты.

#### Заключение

Проведено численное исследование температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей и анализ возможности разрушения изоляции. Для исследуемых образцов изоляционных материалов установлено, что при заданных условиях изоляция может эксплуатироваться.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Половников В.Ю., Хабибулин А.М. Численное моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей с учетом промерзания тепловой изоляции // Известия Томского политехнического университета. – 2012 – Т. 320 – №. 4 – С. 33–36.
2. Кинжибекова А.К., Никифоров А.С., Приходько Е.В. Влияние температурных деформаций кладки на тепловые потери теплоиспользующих агрегатов // Промышленная энергетика. – № 12. – С.34–35.
3. Кузнецов Г.Ф., Бельский В.И., Горбачев В.П. Тепловая изоляция. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.

4. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
5. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
6. ГОСТ 21880-2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. – М.: Стандартинформ, 2012. – 10 с.

Научный руководитель: В.Ю. Половников, к.т.н., доцент, кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КОНСТРУКЦИИ СВЕТОДИОДА**

О.М. Руденко, П.А. Стрижак  
Томский политехнический университет  
Энергетический институт

В настоящее время полупроводниковая светотехника получает все более широкое распространение [1]. С развитием технологий высокопроизводительных светодиодов на передний план на этапе проектирования выходят их тепловые режимы работы [2].

Начиная с 90-х годов XX века наиболее перспективными материалами для выращивания кристаллика являются нитрид галлия и нитрид индий-галлия [3,4]. Как правило, в качестве подложек светодиодов у разных производителей используются медь, сапфир, кремний и карбид кремния [4,5]. В качестве компаунда наибольшее применение получили кремнийорганические герметики (силиконы) и сплавы на их основе [6].

В настоящей работе выполнено численное моделирование процессов теплопереноса в конструкции светодиода. При физической постановке задачи учитываются следующие процессы: при протекании тока через р-п переход в кристаллике происходит выделение энергии в форме излучения, и, как следствие, кристаллик нагревается. Со временем это может приводить к плавлению кристаллика, подложки или компаунда и последующему выходу из строя светодиода. Учитывались два механизма теплопереноса в светодиоде: излучение и теплопроводность. При этом не учитывались зависимости теплофизических характеристик от температуры.

В работе приведены результаты численного исследования тепловых режимов эксплуатации наиболее типичных по конструкции,

размерам и компонентам светодиодов [7]. При моделировании использована общая схема (Рисунок 1).

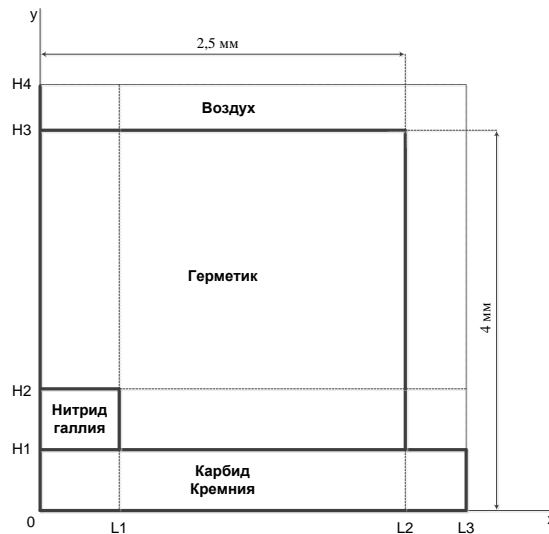


Рис. 1. Общая схема светодиода

Для данной модели выбраны материалы [3-6] и их теплофизические характеристики, указанные в таблице 1.

Таблица 1

Вещество	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	Удельная теплоемкость (Дж/кг·К)	Теплопроводность (Вт/(м·К))
Кристаллик – нитрид галлия	6150	452	130
Компаунд - оптический герметик	1160	1300	0,2
Подложка - Карбид Кремния	3220	670	370
Воздух (373 К)	1,19	1,006	0,025

Разработана математическая модель «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» для наиболее типичной конструкции светодиода, включающая уравнения энергии для кристаллика, основания, компаунда и окружающего воздуха на основании постулатов теории тепломассопереноса [8,9] под воздействием внешней температуры 373 К и тока нагрузке равном 100 мА. При численном моделировании использовался метод конечных разностей.

Зависимость Изменение температуры компаунда вблизи кристаллика при  $0 < t < 3600$  с и внешней температуре 373 К (Рисунок 2) показывает, что прогрев активной области кристаллика происходит интенсивно в течение  $0 < t < 1800$  с. При  $1800 < t < 3600$  изменение  $T$  составляет 1-2 К.

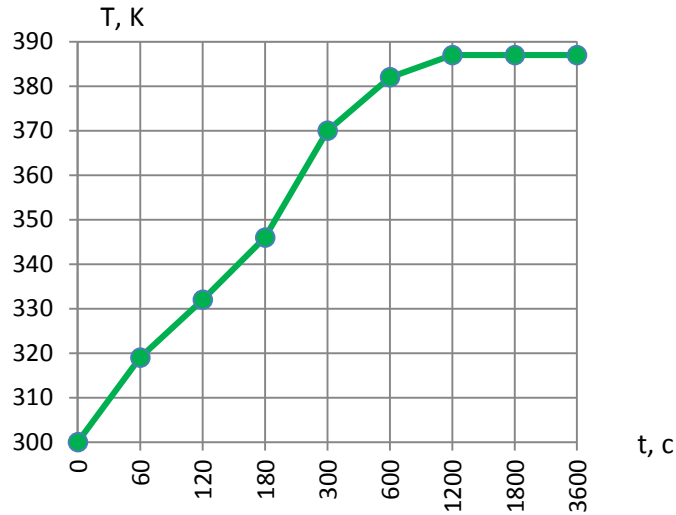


Рис. 2. Изменение температуры компаунда вблизи кристаллика при  $0 < t < 3600$  с и внешней температуре 373 К

Температурное поле (Рисунок 3) показывает, что максимальный градиент температур в системе соответствует области компаунда. Установленные особенности позволяют сделать вывод о целесообразности анализа возможных тепловых режимов работы светодиодов с учетом различных материалов компаунда.

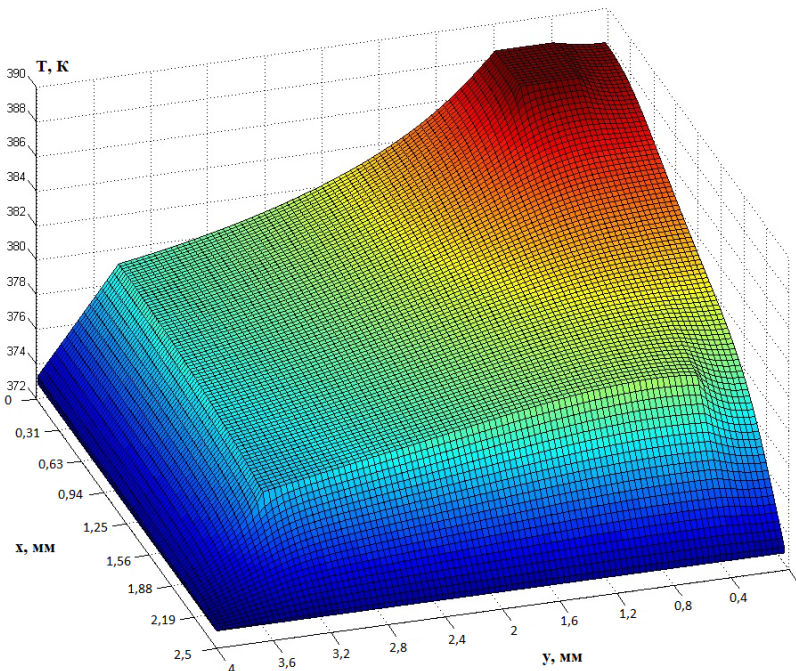


Рис. 3. Температурное поле светодиода при  $0 < t < 3600$  с и внешней температуре 373 К

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-33002).



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Колбатилов Н. Конструктивные особенности полупроводниковой светотехники. Проблема блескости светодиодных светильников // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №6 – С. 32-33.
2. Пескин А. Защита светодиодов от перегрева или Терморезисторы с положительным ТКС как ограничители тока через светодиоды // Компоненты и технологии. – 2011. – №5. – С.22-23.
3. Туркин А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. – 2011. – №5. – С.6-10.
4. Радомский Н. Сравнительный анализ продукции ведущих производителей белых светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №4. – С.6-12.
5. Фейтл А. [Технологии сборки. Эффективный теплоотвод с помощью керамических подложек](#) (перевод Новиков Андрей) // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – №5. – С.46-49.
6. Васильев А. Особенности технологии производства светодиодных светильников // Современная светотехника. – 2010. – №5. – С.41-43.
7. Давиденко Ю. Современные светодиоды // Компоненты и технологии. – 2004. – №5. – С.12-16
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М. - Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
9. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 288 с.

Научный руководитель: П.А. Стрижак, заместитель директора по научной работе Энергетического института, д.ф-м.н., профессор кафедры АТП ЭНИН ТПУ.

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ДВУХФАЗНОГО РАБОЧЕГО ПОТОКА КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ МИНИ-ТЭС

В.С. Высокоморный  
Томский политехнический университет  
Энергетический институт

Энергоснабжение – важнейший аспект функционирования любого промышленного производства. Особую важность вопросы надёжности и ресурсоэффективности снабжения электрической энергией и теплом имеют для предприятий, содержащих на своём балансе удалённые от централизованной энергосистемы объекты (компании нефтегазовой отрасли, транспортные предприятия и др.). Зачастую единственно возможным способом подачи энергии на такие объекты является применение автономных источников энергоснабжения, как правило, мини-ТЭС [1]. Несмотря на то, что производители автономных энергоустановок, как правило, заявляют большие периоды между плановыми техническими обслуживаниями и ремонтами, предприятия, эксплуатирующие эти источники энергоснабжения, довольно часто сталкиваются с проблемами нерегламентированных остановов энергоустановок в межобслуживаемый период, что снижает надёжность энергоснабжения удалённых объектов и их рабочего ресурса.

Ранее проведённый статистический анализ информации о работе 101 автономной мини-ТЭС, обеспечивающей энергоснабжение линейных объектов газотранспортной системы Восточной части России, позволил установить, что одной из основных причин (более 20 %) технических происшествий в работе рассматриваемых мини ТЭС является предельно высокая температура в конденсаторе [2].

Проанализировать первопричины нерегламентированных отказов в работе мини-ТЭС, связанных с предельно высокой температурой в конденсаторе, возможно по результатам проведения дорогостоящих натурных экспериментов, которые потребуют остановки агрегатов, изменения режимов их работы, установки дополнительных датчиков и т.д. В этих условиях наиболее целесообразным представляется проведение численных исследований режимов работы конденсаторной установки мини-ТЭС.

**Цель работы** – исследование режимов работы мини-ТЭС с применением математического моделирования нестационарных процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в конденсаторе автономной энергоустановки.

Автономная энергоустановка функционирует по следующему принципу (рис. 1). Энергия, выделяющаяся при сгорании топлива – природного газа – расходуется на нагрев и испарение органического рабочего вещества (дихлорбензола) в парогенераторе. Далее рабочее вещество в виде пара поступает на лопатки турбины, приводя её вращение. На одном валу с турбиной находится электрогенератор, вырабатывающий переменный электрический ток. Рабочее вещество направляется в трубки воздушной конденсаторной установки, где охлаждается и переходит в жидкую фазу. Затем рабочее вещество насосом возвращается в парогенератор, попутно смазывая подшипники турбогенератора, и цикл повторяется (рис. 1).

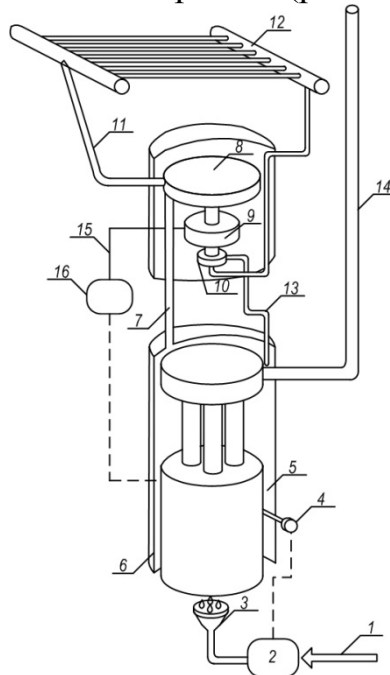


Рис. 1. Схема энергоустановки, работающей по замкнутому циклу пара: 1 – подвод топлива; 2 – панель управления подачей горючего; 3 – горелка; 4 – термостат; 5 – органическая жидкость; 6 – парогенератор; 7 – пар; 8 – турбина; 9 – генератор переменного тока; 10 – насос; 11 – подача пара в конденсатор; 12 – конденсатор; 13 – вывод конденсата; 14 – дымовая труба; 15 – кабели входа переменного тока к выпрямителю; 16 – электрический щит

Воздушный конденсатор энергоустановки представляет собой 2 ряда оребренных трубок внутренним диаметром  $D_{in}=38$  мм, объединенных коллекторами. Расстояние между трубками конденсатора в ряду составляет  $L \approx 0.15D_{in}$ .

Постановка задачи численного моделирования процесса конденсации с соответствующем узле мини-ТЭС аналогична [3].

На рис. 2 приведены результаты численного исследования интегральных характеристик процесса конденсации в трубке в зависимо-

сти от различных значений температуры окружающего воздуха при изменении температуры двухфазного рабочего потока на входе в трубку. Результаты численного моделирования процесса конденсации хорошо согласуются с данными завода-изготовителя, устанавливающими соответствие между мощностью энергоустановки, температурой окружающей среды и температурой рабочего потока на выходе из конденсатора [1].

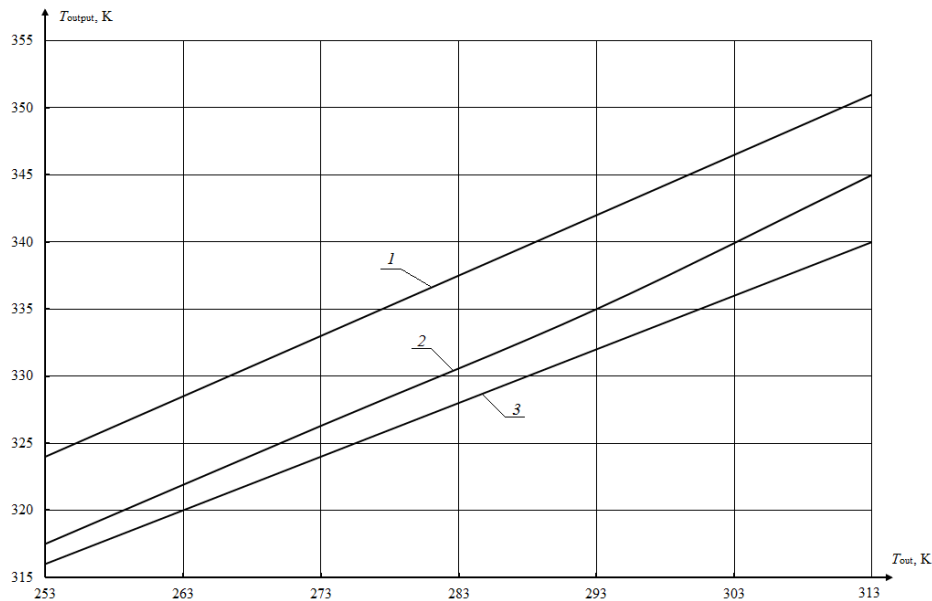


Рис. 2. Зависимости выходной температуры рабочего потока  $T_{output}$  от температуры окружающего воздуха  $T_{out}$ : 1 –  $T_{output}$  при  $T_1=447 K$ ; 2 –  $T_{output}$  при  $T_1=426 K$ ; 3 –  $T_{output}$  при  $T_1=403 K$

На рис. 3 приведены зависимости выходной температуры двухфазного рабочего потока от параметра  $\alpha_a$ , характеризующего условия охлаждения воздухом трубки конденсаторной установки при различных температурах окружающей среды.

Рис. 3 иллюстрирует, что при увеличении коэффициента теплоотдачи  $\alpha_a$  температура двухфазного рабочего потока на выходе из трубки конденсаторной установки при одинаковой температуре окружающей среды уменьшается. Следовательно, увеличение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_a$  позволит уменьшить выходную температуру рабочего потока из конденсаторной установки, что обеспечит уменьшение количества технических происшествий в работе энергоустановок, связанных с повышением температуры процесса конденсации при эксплуатации автономных энергоустановок в летнее время.

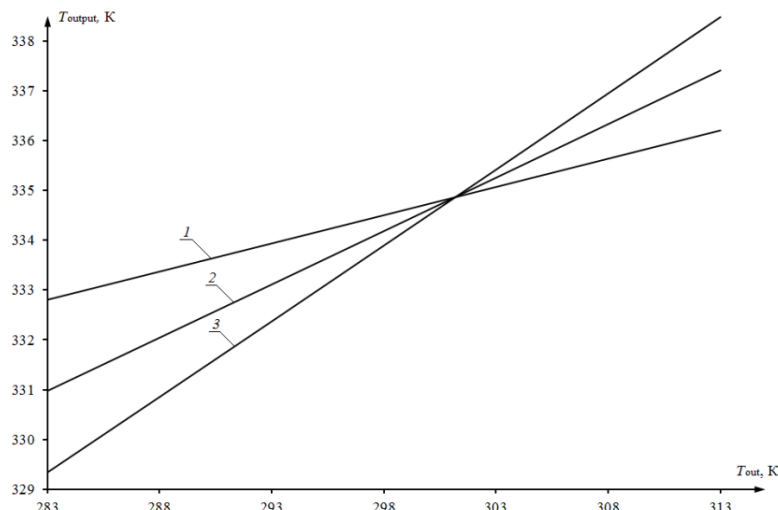


Рис. 3. Зависимости выходной температуры рабочего потока  $T_{\text{output}}$  от условий охлаждения  $\alpha_a$ : 1 –  $T_{\text{output}}$  при  $\alpha_a = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 2 –  $T_{\text{output}}$  при  $\alpha_a = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 3 –  $T_{\text{output}}$  при  $\alpha_a = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Полученные результаты свидетельствуют о незначительном влиянии изменения коэффициента теплообмена  $\alpha_a$  на выходную температуру конденсирующегося рабочего потока. В связи с этим можно сделать заключение о невысокой эффективности применения для интенсификации процесса конденсации принудительного обдува внешней поверхности конденсатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 2.80.2012).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Eps operation & maintenance manual (powered by CCVT) // This document contains information that is proprietary to ORMAT SYSTEMS LTD. 2006. – part 2. – 600 p.
2. Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А. Анализ причин аварийных технических происшествий на автономных источниках энергоснабжения удаленных объектов Единой системы газоснабжения России // Энергетик, 2013. № 3. С. 26–32.
3. Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А. Численное исследование влияния параметров рабочей среды на интегральные характеристики работы конденсаторной установки автономных источников энергоснабжения // НИ ТПУ. Томск, 2013. 23 с. Деп. в ВИНТИ 16.09.2013, № 258–В2013.

Научные руководители: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ; П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор, зам. проректора-директора по научной работе ЭНИН ТПУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

Вступительная статья Председателя РНК СИГРЭ, Председателя Правления ОАО «СО ЕЭС» Аюева Бориса Ильича .....	3
Вступительная статья проректора-директора Энергетического института Томского политехнического университета Боровикова Юрия Сергеевича .....	5
Вступительная статья руководителя Оргкомитета Молодежной секции РНК СИГРЭ Гофмана Андрея Владимировича .....	7

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

<b>Ю.П. Загайнова.</b> Анализ влияния количества отключаемых генераторов на обеспечение динамической устойчивости генераторов Саяно-Шушенской ГЭС.....	9
<b>А.П. Шубенкина.</b> Поиск опасных сечений в системообразующей сети Томской энергосистемы .....	13
<b>Н.Ш. Чемборисова, И.В. Буков.</b> Анализ свойств отдельных узлов в интеллектуальной сети.....	16
<b>И.Н. Баширов.</b> Сопоставление схем для расчётов электрических режимов с использованием ранжированного списка узлов.....	20
<b>Ю.Н. Веприк, О.А. Ганус.</b> Математическое моделирование элементов электрических систем в фазных переменных неявными методами .....	24
<b>Р.А. Мухин.</b> Моделирование выпрямителей с активно-емкостной нагрузкой для электроэнергетических сетей .....	28
<b>А.И. Ворачева.</b> Исследование трехфазного короткого замыкания в простейшей цепи .....	30
<b>Д.Ю. Ивлева.</b> Коррозия как основная причина поломок теплосетей и методы её диагностики.....	34
<b>К.С. Колясников, П.М. Ерохин.</b> Дооптимизация суточных режимов ГЭС .....	38
<b>Д.Ф. Мавлетчина.</b> Применение критериев статической устойчивости на примере одномашинной энергосистемы с АРВ.....	42

<b>С.Б. Смагулов, Т.Б. Акимжанов.</b> Расчет добавочных потерь электроэнергии в ЛЭП 110 кВ на примере Ростовэнерго и Бурятэнерго.....	46
<b>Е.А. Калинина, В.В. Черепанов.</b> Модель совместной работы электроприемников с резкопеременной нагрузкой и производственных потребителей .....	51
<b>Н.Ш. Чемборисова, К.А.Лысова , А.Е. Суркова.</b> Использование показателей схемы при оценке коэффициентов запаса по напряжению и оптимизации режима .....	55
<b>И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин.</b> Оценка статистических свойств несистематической ошибки устройств синхронизированных векторных измерений .....	58
<b>А.А. Крадецкая.</b> Апробирование методики поиска опасных сечений и максимально допустимых перетоков по ним на примере тренировочной схемы .....	62
<b>А.А. Сидоров, А.Е. Сидоров.</b> Целесообразность оптимизации системы электроснабжения промышленного предприятия.....	66
<b>Г.С. Шабалин, А.В. Паздерин, В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин.</b> Использование матрицы Якоби для определения актуальной границы статической устойчивости энергосистемы .....	68
<b>Е.Д. Филин.</b> Исследование режимов работы полуволновой линии электропередачи на физической модели.....	72
<b>Р.Ф. Галиев.</b> Особенности моделирования трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации в расчетах установившихся режимов.....	75
<b>Н.Н. Смотров, Г.Ч. Чо.</b> Допустимые радиусы действия центров питания распределительных электрических сетей с учетом надежности электроснабжения потребителей .....	79
<b>О.А. Лозикевич.</b> Формирование расчетной модели для исследования переходных процессов в энергосистеме Приморского края .....	83
<b>А.А. Суворов.</b> Модель управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора .....	86
<b>Р.А. Уфа.</b> Разработка модели высоковольтной передачи и вставок постоянного тока в гибридной среде моделирования .....	91
<b>А.А. Крадецкая.</b> Testing of procedure for dangerous sections and maximum allowed power flows within them identification using testing scheme .....	95

**В.А. Сулайманова.** Математическая модель системы возбуждения синхронной машины..... 99

**Т.Ю. Иванова, А.А. Козырева, Т.А. Сергеева.** Оценка рыночного потенциала цифровых трансформаторов тока с измерением на высокой стороне ..... 101

## **2. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**М.В. Андреев.** Разработка программных средств достоверной настройки дифференциальных защит трансформаторов..... 106

**И.В. Данько.** Реконструкция системы энергоснабжения предприятия путем установки комплектного распределительного устройства серии КМУ-1 ..... 110

**П.Н. Шаурко.** Поведение релейной защиты при неполнофазном нагрузочном режиме ЛЭП 110 кВ ..... 115

**Н.А. Беляев, Ю.В. Хрущев.** Синтез устройства адаптивной синхронизации генераторов и частей энергосистем как элемента построения Smart-grid ..... 118

**Н.А. Волохов.** Устройство системы автоматического регулирования частоты вращения турбин и принципы её устойчивого функционирования ..... 123

**Б.Е. Машрапов.** Дифференциальная защита ячеек комплектных распределительных устройств от дуговых замыканий ..... 125

**В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин, Г.С. Шабалин, А.В. Паздерин.** Определение параметров регулятора возбуждения с помощью смещения полюсов модели энергосистемы..... 127

## **3. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

**Д.Н. Баклай.** Информационно-аналитическая система «СИРЕНА» – диагностика состояния высоковольтного энергетического оборудования ..... 132

**А.В. Лазукин, О.А. Новодворский, С.А. Кривов.** Особенности трекообразования на наноразмерном поркытии  $TiO_2$  под воздействием высоковольтного поверхностного разряда ..... 136

**Н.А. Аманжолова, В.С. Логинов.** USWO-регуляторы. Формирование алгоритма управления..... 140



<b>Д.Е. Лебедев.</b> Способ аэродиagnостики воздушных линий электропередачи высокого напряжения при помощи беспилотных летательных аппаратов .....	144
<b>С.В. Гундарева, А.Г. Темников, И.Е. Калугина.</b> Особенности моделирования молниезащиты взрывоопасных объектов.....	148
<b>Е.Н. Федосеенко.</b> Вариант обеспечения нормативных значений электрических характеристик заземлителя высоковольтной подстанции .....	152
<b>М.С. Хмелик, С.С. Шевченко.</b> Оптимизация параметров оборудования на основе расчета электромагнитного поля .....	156
<b>А.А. Фролов.</b> Снижение стоимости трехфазного силового трансформатора номинальной мощности 160 кВа, напряжением обмотки ВН 10 кВ, НН – 0,4 кВ.....	161
<b>А.С. Карпов, В.В. Ярошевич.</b> Выявление направлений развития сетей 6-35 кВ на основе опыта мониторинговых исследований показателей качества электроэнергии в высоковольтной сети Северо-запада России.....	163

#### 4. ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

<b>Е.А. Субботина, К.В. Филатов.</b> Варианты определения фактических нагрузок потребителей для закрытых тепловых сетей.....	168
<b>П.В. Стружков.</b> Перспективы развития теплофикации, теплоснабжения и электроэнергетики в России .....	171
<b>Д.В. Гудеменко.</b> Применение бессеточного метода MPS для моделирования фрагментации капли кориума.....	175
<b>М.В. Запорожец, А.А. Дятловский.</b> Влияние объемов, содержащих пар в горизонтальных парогенераторах и параметров воды в системе подачи питательной воды на вибрации главных паропроводов АЭС с ВВЭР .....	179
<b>Г.А. Китаев, С.В. Лавриненко.</b> Компьютерное моделирование в атомной энергетике .....	184
<b>Э.Р. Зверева, Р.В. Хабибуллина.</b> Улучшение вязкостно-температурных характеристик энергетического топлива.....	188
<b>Г.И. Худякова, П.А. Ральников.</b> Расчетные исследования технологической схемы угольной ПГУ .....	192

<b>М.В. Кузнецов.</b> Радиоактивные отходы и проблемы их уничтожения.....	197
<b>А.А. Францева.</b> Эффективность системы комбинированного теплоснабжения.....	201
<b>А.Д. Козырев.</b> Организация контроля качества электроэнергии на Бийской ТЭЦ-1 и его анализ .....	204
<b>Н.В. Миронова.</b> Технологическая готовность поточных газификаторов твердого топлива.....	208
<b>Р.И. Горбатов.</b> Опыт эксплуатационной химической очистки двух котлов К-50-14-250.....	212
<b>А.Е. Рыльский.</b> Применение воздушных конденсаторов в теплоэнергетике .....	215

## **5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТОПЛИВО**

<b>А.В. Пономаренко.</b> Применение технологии плазменного напыления для увеличения энергоэффективности ротора турбогенератора .....	219
<b>С.А. Хаустов.</b> Разработка аппаратно-программного комплекса для конструирования жаротрубных котлов.....	221
<b>М.Г. Подвицкий, В.А. Соловьев.</b> Термостабилизация полувагона при транспортировке увлажненных сыпучих грузов в условиях отрицательных температур .....	224
<b>И.П. Каменев, Е.Г. Карпов.</b> Вариант использования кавитационного водоугольного топлива на действующих ТЭС.....	228
<b>А.Н. Кучерина, А.С. Дьяченко, А.Ю. Долгих.</b> Исследование термической переработки бурых углей Шивэ-Овооского месторождения Монголии.....	232
<b>А.Н. Кучерина, А.С. Дьяченко, А.Ю. Долгих.</b> Комплексное использование бурых углей Шивэ-Овооского месторождения Монголии .....	236
<b>С.И. Гордеев, С.Д. Нестеров.</b> Влияние принудительного обдува нагретым воздухом на процесс выгорания угольных коксов.....	240

## 6. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

- И.Р. Шангараев, В.В. Звездин, В.М. Кузнецов.** Модуляция ультразвуковых колебаний после воздействия импульсного лазерного излучения ..... 245
- А.Э. Ни.** Моделирование нестационарного теплообмена в помещениях, обогреваемых газовыми инфракрасными излучателями ..... 247
- А.С. Горшенин.** Исследование процесса термической обработки алюминиевых слитков на основе регулируемого конвективного теплообмена ..... 252
- Т.Е. Смышляева, А.Э. Опалев.** Математическое моделирование естественной конвекции в морозильной камере холодильной установки..... 256
- Е.Г. Орлова.** Испарение капель водного раствора NaCl на твердой подложке ..... 259
- И.О. Мингазетина.** Испарение капель дистиллированной воды на твердой подложке ..... 263
- Д.О. Глушков.** Энергоэффективное зажигание твердых и гелеобразных конденсированных веществ в условиях локального нагрева ..... 267
- О.Н. Попов, Н.П. Жуков.** Моделирование теплопереноса от двух нагревателей в полуограниченном теле..... 271
- А.С. Кравчук.** Динамический контактный угол и свойства контактной линии капли жидкости, увеличивающейся в размерах на твердой поверхности..... 275
- А.С. Красношлыков, Г.В. Цветков, В.И. Максимов.** Моделирование теплообменных процессов в холодильной камере с применением программного пакета Comsol Multiphysics..... 279
- Н.В. Демьянович, В.И. Максимов.** Математическое моделирование естественной конвекции в прямоугольной области с теплопритоком на внешних границах и с локальным источником теплопоглощения ..... 283
- Е.В. Пудовкина.** Измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств двухслойных изделий ..... 287
- Д.С. Осотова, А.В. Захаревич.** Экспериментальное исследование процесса зажигания травяной ветоши одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей..... 291

<b>А.О. Жданова.</b> Определение характерных времен прекращения реакции термического разложения типичных лесных горючих материалов при воздействии «водяного снаряда».....	295
<b>А.С. Наумкин, А.В. Захаревич.</b> Экспериментальное исследование зажигания твердого топлива одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей .....	298
<b>М.В. Пискунов, Д.М. Лазарев, В.Ю. Половников.</b> Анализ возможности разрушения низкотемпературной изоляции .....	302
<b>О.М. Руденко, П.А. Стрижак.</b> Численное моделирование процессов теплопереноса в конструкции светодиода .....	306
<b>В.С. Высокоморный.</b> Оценка влияния характеристик внешней среды на параметры двухфазного рабочего потока конденсаторной установки мини-ТЭС .....	310

*Научное издание*

**МАТЕРИАЛЫ I МЕЖДУНАРОДНОГО ФОРУМА  
«ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

4. Сулайманов А.О. к.т.н., доцент, начальник научного отдела ЭНИН ТПУ, председатель
5. Гусев А.С. д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
6. Вайнштейн Р.А. д.т.н., доцент кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
7. Лавринович В.А. д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
8. Беляев Л.А. к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ
9. Заворин А.С. д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГСипГУ ЭНИН ТПУ
10. Кузнецов Г.В. д.ф-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ
11. Лукутин Б.В. д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭПП ЭНИН ТПУ
12. Озерова И.П. к.т.н., доцент, зав. кафедрой АТП ЭНИН ТПУ
13. Муравлев О.П. д.т.н., профессор кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ
14. Сивков А.А. д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ

Вёрстка и дизайн оригинал макета: Зимина Н.А.

Подписано к печати 14.10.2013. Тираж 300 экз.

Кол-во стр. 321. Заказ № 57-13

Бумага офсетная. Формат А-6. Печать RISO

Отпечатано в типографии ООО «РауШ мбх»

Лицензия Серия ПД № 12-0092 от 03.05.2001г.

634034, г. Томск, ул. Усова 7, ком. 046

тел. (3822) 56-44-54