

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Академия технологических наук Российской Федерации  
Верхне-Волжское отделение АТН РФ

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Международной научно-технической конференции

### **«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**

(XIV Бенардосовские чтения)

**29-31 мая**

I том

**Иваново 2007**

В I томе тезисов докладов научно-технической конференции отражены результаты научных исследований в области теории и практики электротехники и электротехнологии; математического моделирования, информационных систем и технологий; систем управления и автоматизации; рассмотрены вопросы надежности, эффективности и диагностики электрооборудования станций и энергосистем; тепловые и атомные электрические станции, а также методы анализа и синтеза систем управления электроприводами и установками.

Редакционная коллегия:

засл. деятель науки, д-р техн. наук, проф. **С.С. ТАРАРЫКИН** (председатель), д-р техн. наук, доц. **В.В. ТЮТИКОВ** (зам. председателя), акад. МАИ, д-р техн. наук, проф. **В.Н. НУЖДИН**, д-р техн. наук, проф. **Ю.А. МИТЬКИН**, д-р техн. наук, проф. **А.В. МОШКАРИН**, чл.-кор. АЭН РФ, д-р техн. наук, проф. **В.А. САВЕЛЬЕВ**, д-р техн. наук, проф. **В.А. ПОЛЕТАЕВ**, заведующая РИО **С.В. КЛЮНИНА**

ISBN 978-5-89482-473-4  
ный

© □ ГОУВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина, 2007.



## СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

### Подсекция «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ»

УДК 621.365.5

А.Н. ГОЛУБЕВ, д.т.н., профессор, С.Н. КАДНИКОВ, д.т.н., профессор,  
Л.Б. КОРЮКИН, студент, М.И. СОГАНОВ, студент  
(ИГЭУ)

#### Численное моделирование процессов индукционного нагрева

Индукционная закалка является одним из основных и наиболее эффективных способов упрочнения поверхностных слоев деталей машин. Большие резервы повышения эффективности этого метода заключаются в возможности совершенствования конструкций индукторов и оптимизации собственно режимов закалки. Существующие методы проектирования установок индукционной закалки обычно основаны на применении грубых приближенных методик, опирающихся на экспериментальные данные. Ввиду достаточно сложной зависимости между термическими и энергетическими параметрами технологического процесса такой подход не позволяет получить оптимальные параметры конструкций индукторов и режимов закалки. Поэтому проектирование установок индукционной закалки должно опираться на современные методы математического моделирования на ЭВМ.

В докладе рассматривается методика моделирования индукторов и режимов индукционной закалки дорожек качения опорно-поворотных устройств автомобильных кранов. Основой разработанной методики являются точные математические модели электромагнитных и тепловых процессов индукционной закалки. При этом закаливаемая область рассматривается как кусочно-однородная среда. Для расчета квазистационарного электромагнитного поля в области индуктора и в зоне закалки в каждом однородном участке используются уравнения типа Гельмгольца в линейном приближении:

$$\frac{\partial^2 A_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_i}{\partial y^2} - j\omega\mu_0\mu_i\gamma_i = 0.$$

Для расчета теплового поля используется нестационарное нелинейное уравнение теплопроводности, в котором учитывается зависимость удельных теплопроводности и теплоемкости от температуры:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i c_i} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right].$$

В качестве среды моделирования был использован программный комплекс ELCUT 5.4. С применением специально разработанных программных надстроек на его основе создан расчетный модуль, обеспечивающий максимальное снижение трудозатрат проектировщика за счет программного обмена данными между электромагнитным и тепловым расчетами и использования интерфейса с широким меню, обеспечивающим задание геометрии индуктора и закаливаемой области.

## **Математическое моделирование поверхностного эффекта в ферромагнетике**

При расчетах электромагнитного поля в нелинейном ферромагнетике до сих пор применяются различные эмпирические методики, основанные на приближенных формулах и физическом эксперименте. Но вопрос о точности такой методики остается открытым. Между тем при проектировании, например, установок для индукционного нагрева и индукторов для индукционной закалки необходимо достоверно знать распределение магнитного поля внутри стальных деталей с учетом нелинейностей и вихревых токов. Эту проблему можно успешно решать только с применением численных методов. Поэтому представляется актуальной разработка подобных методов моделирования электромагнитного поля в нелинейной ферромагнитной среде. Это позволит детально исследовать характер электромагнитных явлений, происходящих в нелинейной среде и создать базу для оценки точности различных приближенных методик.

Рассматривалась характерная одномерная задача, когда на поверхности плоской стальной стенки, толщина которой значительно больше глубины проникновения, задано переменное магнитное поле с гармонически изменяющейся напряженностью. Данная задача решалась методом сеток. Испытывались различные способы аппроксимации и методы решения полученных нелинейных уравнений. Вначале были рассмотрены явная схема на пятиточечном шаблоне и неявная схема первого порядка точности по времени и второго по пространству. Данные подходы потребовали неоправданно высоких затрат машинного времени при работе на нелинейных участках магнитной характеристики ферромагнетика

Анализ показал, что основной причиной возникающих проблем является плохая обусловленность системы обыкновенных дифференциальных уравнений, к которой может быть сведено решение нелинейного уравнения в частных производных, описывающего картину поля в ферромагнетике. При решении данной системы наилучшие результаты показал полунеявный метод Розенброка, применение которого для решения уравнений в частных производных ранее не рассматривалось.

В результате были получены временные зависимости параметров поля, а также графики действующих значений. Точность представленных результатов составляет не менее 1 %. Полученные результаты имеют достаточно универсальный характер, поскольку электромагнитное поле в стали у ее поверхности всегда близко одномерному.

## **Численное моделирование плоских электромагнитных волн в ферромагнетике**

Проблема расчета электромагнитного поля с нелинейностями ферромагнетиков, возникающая при моделировании процессов в трансформаторах, устройствах индукционного нагрева и закалки является в настоящее время одной из наиболее насущных. Причина этого состоит в том, что точность расчета поля в нелинейной магнитной среде, как правило, остается неопределенной, поскольку в известные алгоритмы изначально закладываются мало обоснованные допущения. Поэтому представляется актуальным проверить корректность известных численных методик расчета электромагнитного поля, основанных на допущениях физического характера, по результатам расчета с использованием алгоритмов, сходимости, которых к точному решению может быть доказана.

В качестве одной из модельных задач рассматривался процесс проникновения плоской электромагнитной волны в нелинейный ферромагнетик. При этом все пространство разделено на три слоя: медь, по которой протекает ток, воздух и сталь. Из уравнений Максвелла можно получить нелинейное уравнение в частных производных, описывающее процесс распространения плоской электромагнитной волны в стали. Формально точное решение данной задачи может быть найдено методом сеток. Подход, основанный на замене уравнения в частных производных системой обыкновенных дифференциальных уравнений и решении ее по методу Розенброка, пригоден для проведения практических расчетов, однако требует слишком больших затрат времени. Особенно это сказывается, например, при многократных расчетах поля в алгоритмах расчета индукционного нагрева стали. В качестве альтернативы предлагается методика, основанная на замене нелинейной магнитной среды кусочно-однородной и применении метода эквивалентных синусоид. При этом основной проблемой является определение нелинейной зависимости  $\mu_a(H_d)$ . Для этого используется предыдущее решение данной задачи по точному численному алгоритму. Расхождение результатов расчета действительных значений по точной и приближенной методикам оказалось вполне удовлетворительным.

Используемая приближенная методика вполне пригодна для практических расчетов. Однако с уменьшением числа интервалов разбиения расчетного отрезка точность приближенного расчета быстро падает. Поэтому использование 2-3 интервалов, как это зачастую предлагается, к достоверным результатам привести не может.

## Граничные интегральные уравнения для расчета поля в анизотропной магнитной среде

Работа посвящена построению и обоснованию математических моделей для расчета плоскопараллельного магнитостатического поля в анизотропной среде. Наиболее точные и экономичные математические модели для расчета поля в линейной анизотропной среде могут быть получены методом граничных интегральных уравнений (ГИУ). Для построения ГИУ обычно используется метод вторичных источников [1]. Однако в отличие от кусочно-однородной среды, для расчета поля в которой на границе раздела сред достаточно ввести только один вид вторичных источников – либо слой зарядов, либо слой токов, при наличии областей, заполненных анизотропной средой, необходимо вводить два неизвестных распределения вторичных источников.

В статье рассмотрена методика построения математических моделей для расчета магнитостатического поля в анизотропной среде в виде систем интегральных уравнений. Доказана принадлежность полученной системы к классу систем сингулярных интегральных уравнений. Установлена единственность ее решения. Однако в случае сингулярной системы в отличие от систем интегральных уравнений Фредгольма необходимо доказывать существование решений. Здесь мог быть использован формальный подход, основанный на том, что производные потенциалов простого слоя, присутствующие в системе, могут быть выражены через сингулярные интегралы Коши на комплексной плоскости [2]. Это дало бы возможность применения известной теории сингулярных интегральных уравнений. Однако такой прием приводит к существенным затруднениям в случае кусочно-гладких контуров, что наиболее актуально для практики. Поэтому в работе используется другой, более перспективный подход, учитывающий физические свойства данной задачи, который может быть распространен на системы уравнений для расчета трехмерного поля.

### Литература

1. **Тозони О.В., Маергойз И.Д.** Расчёт трёхмерных электромагнитных полей. – Киев: Техника, 1974. – 352 с.
2. **Мухелишвили Н.И.** Сингулярные интегральные уравнения. – М.: Наука, 1968. – 512 с.

## **Автоматизация процессов обучения по курсу «Теоретические основы электротехники»**

С каждым днем организация учебного процесса всё чаще проходит с привлечением современных информационных технологий. Компьютеризация учебного процесса стала одним из основных направлений решения вопроса «качества образования». Автоматизация в большинстве случаев касается процессов обучения. Но помимо компьютерного обучения, изучение курса ТОЭ предполагает выполнение домашних расчетно-графических или курсовых работ. При этом преподавателю приходится тратить много времени для проверки этих работ, исправление ошибок, а также на защиту этих работ студентами.

В Ивановском государственном энергетическом университете на кафедре «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» разработана одна из составляющих программного комплекса EILabWork 2.0, которая позволяет предварительно «защитить» курсовую работу не преподавателю, а компьютеру, при этом система оценивает не только правильность выполненной работы, а также оценивает полученные знания студентами при выполнении данной работы.

При работе с программой студент вначале описывает схему, ввод которой происходит пошагово отдельно для каждой ветви. При этом каждая ветвь отображается графически, что позволяет избежать ряда ошибок при описании схемы. По завершению построения, схема отображается целиком. Ее также можно расположить в удобном виде, достаточно лишь «перетащить» мышкой элементы и узлы схемы. Такой интерактивное построение схемы позволит ввести данные максимально быстро, просто и поможет избежать лишних ошибок при построении схемы. Предусмотрена возможность сохранения и загрузки введенной схемы. Перед анализом ведется первичный анализ правильности введенной схемы. Если студент ввел схему с явными ошибками, то система сообщит ему об этом.

Модуль автоматически рассчитывает схему, не показывая данные студенту. В качестве параметров для вопроса используются рассчитанные параметры схемы. После этого, студент выполняет задания системы по своей курсовой работе, которые составляются заранее в оболочке EILabWork 2.0.

Таким образом, контрольно обучающая система EILabWork 2.0 в совокупности с разработанным модулем позволяет не только проводить обучение студентов по разделам курса ТОЭ, но и освобождает преподавателя от рутинного труда по проверке, исправлению и защите курсовых и домашних работ студентами.

## **Применение обучающего комплекса в курсе «Источники питания электротехнологических установок»**

Фирмы производители электросварочного оборудования заявляют, что в настоящее время до 70 % выпускаемой продукции составляют инверторные источники сварочного тока (ИП). Этот факт нельзя обойти при преподавании курса «Источники питания» для специальности 405605.65. Во время курсового проектирования студенты выполняют расчет силовой части инвертора.

Расчет данных устройств имеет особенность. Если, в качестве доминирующего, принять критерий минимума массогабаритных показателей, то обязательно придется достаточно точно учитывать греющие потери в полупроводниках и в трансформаторе. Этот расчет, как любая многофакторная задача, представляет для студентов определенную сложность. С другой стороны, студент ограничен по времени и провести оптимизацию разработки, зачастую не представляется возможным.

С целью обеспечения более качественного проектирования для студентов был разработан комплекс для расчета инверторных источников питания. Комплекс содержит теоретическую часть, включающую в себя вопросы общей теории проектирования ИП и примеры конкретных расчетов. За основу принята методика, изложенная в (1). В справочной части комплекса имеется информация об элементной базе полупроводников, ферритов, электронных комплектующих. Также в состав комплекса входит расчетный блок, выполненный в символах MathCAD.

Особенностью данной разработки является возможность оперативного изменения практически всех составляющих комплекса, что позволяет пополнять новыми данными, как справочную часть, так и теоретический блок.

Комплекс установлен в вычислительном центре кафедры ТОЭЭ и функционирует в среде Internet Explorer.

Двухгодичная практика применения элементов данного комплекса в курсовом проектировании показала возможность проведения оптимизации всего расчета. Это позволяет выполнить (или выбрать из нескольких) расчет, наиболее полно отвечающий заданному критерию, что приближает студенческую разработку к производственной.

### **Литература**

1. **Зраносян С.А.** Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 176 с.

## Применение программы Comsol Multiphysics для моделирования и исследование свойств плоских индукторов с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости

Плоские индукторы активно используются в электротехнических, электротехнологических (нагрев, закалка), а также в медицинских целях (в качестве магнитного стимулятора) [1]. Во всех случаях необходимо знать электрические параметры индукторов: активное и реактивное сопротивление, потребляемую мощность, величину и форму электромагнитного поля, создаваемого индуктором. Внешний вид плоского индуктора показан на рис.1.

Приближенно определить индуктивность катушки можно, исходя из аналитических расчетов, представленных литературе [2]. Однако данные решения не учитывают эффектов близости, поверхностных и витковых эффектов.

Данная работа направлена на определение параметров индукторов и их полей с использованием сочетания цепных и полевых методов расчета с применением программы Comsol Multiphysics [3, 4]. Расчет осуществлялся с использованием двухмерной (2D) осесимметричной модели.

В расчёте используется уравнение квазистатического поля:

$$\left(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon\right)A_{\varphi} + \nabla \times \left(\mu^{-1}\nabla \times A_{\varphi}\right) = \frac{\sigma U_{\text{витка}}}{2\pi r}, \quad (1)$$

дополненное необходимыми граничными условиями.

Расчет содержит внутренние и внешние итерационные циклы. Внутренние циклы заложены непосредственно в решатели Comsol Multiphysics и возвращают решение уравнения (1) методом конечных элементов. Внешние циклы программируются пользователем самостоятельно и направлены на определение параметров уравнения (1). При формировании внешних циклов одной из основных задач было определение комплексных значений напряжений на витках ( $U_{\text{витка}}$ ) с целью задания и получения одной и той же комплексной величины тока во всех витках.

В докладе представлены способы построения модели с применением программы. Рассматривается организация последовательных и параллельных вычислений, их достоинства и недостатки. Построение моделей осуществлялось с применением пользовательского интерфейса, а также непосредственным написанием Skript-файлов.

### Литература

1. **Лебедев В.Д.**, Лебедев Д.А. Моделирование электромагнитных полей и исследование режимов работы магнитного стимулятора // Вестник ИГЭУ. – 2006. – №4. – С. 86 – 88.
2. **Немцов М.В.** Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
3. <http://matlab.exponenta.ru>

4. <http://matlab.ispu.ru>.

## **Повышение стабильности разборных сильноточных контактов в условиях электролизного производства**

В условиях агрессивной среды химического производства при нагрузочных токах в десятки кА к разборным электрическим контактам предъявляются повышенные требования, относящиеся в первую очередь к стабильности их переходного сопротивления в течение длительного времени эксплуатации. Невыполнение этих требований приводит к дополнительным потерям, снижению срока службы и необходимости часто-го вывода в ремонт всей линии электролизеров.

Одним из возможных методов повышения стабильности контактного перехода является металлопокрытие контактных поверхностей окуна-нием в расплав олова и его сплавов. Однако, в условиях промышленной эксплуатации такой метод является нетехнологичным.

С целью стабилизации переходного сопротивления разборного со-единения проведены работы для контактного соединения медная шина – стальной вывод электролизера, планированный медью. Атмосфера, в которой находился электрический контакт, содержала пары ртути, щело-чи, хлора, водорода. Температура в месте контактного перехода состав-ляла 50°С. При таких внешних условиях данная контактная пара пред-ставляет собой малоустойчивый контакт.

Для решения указанной проблемы нами предложено металлопокры-тие эвтектикой *In-Ga-Sn* с температурой плавления 10,6°С. Галлий, входя-щий в эвтектику, хорошо смачивает металлы, обладает большой способно-стью проникать по границе зерен металлов. Индий относится к числу бла-городных металлов, стоек к окислению, обладает хорошей электро- и теп-лопроводностью. Технология нанесения очень проста: на предварительно зачищенную поверхность наносится эвтектика, затем контакт собирается.

Вторым видом металлопокрытия, примененным нами, является сплав повышенной вязкости с температурой плавления 10,6°С. Этот сплав содержит около 60 % *In-Ga-Sn*, 0,5 % окислов компонентов эвтекти-ки и около 40 % составляет порошок тугоплавких металлов с размером зерен от 10 до 40 мкм. Введение окислов и порошка тугоплавких метал-лов повышает стабильность сплава в условиях агрессивной среды и об-легчает процесс нанесения.

Применение предложенных металлопокрытий позволяет умень-шить переходное сопротивление за счет заполнения микронеровностей контактных поверхностей жидким металлом и обеспечить его стабиль-ность в течение длительного времени эксплуатации электролизера.

## Некоторые аспекты проектирования инверторных источников сварочного тока

Снижение массогабаритных показателей инверторных источников питания сварочного тока (ИП) связано с повышением внутренней частоты инвертора.

Увеличенная токовая нагрузка на коммутаторы инвертора заставляет разработчиков искать пути снижения потерь в транзисторах. Это может быть реализовано несколькими способами, например, включением в параллель нескольких идентичных инверторов. Однако этот путь связан со значительными материальными затратами на элементную базу систем управления. Второй путь это изготовление высокочастотного трансформатора с несколькими параллельными ветвями в первичной обмотке, каждая из которых питается от своего полупроводникового инвертора. В этом случае из-за неидеальности коммутирующей аппаратуры (различное время открытия и закрытия силовых транзисторов), ток в параллельных ветвях получается различным. Это, в свою очередь, приводит к локальным перегревам в области расположения обмотки с большей токовой нагрузкой и как следствие, к выходу из строя трансформатора. Для выравнивания токовой нагрузки в параллельных ветвях первичной обмотки трансформатора предлагается применить схему, описанную в (1) и приведенную на рис. 1.

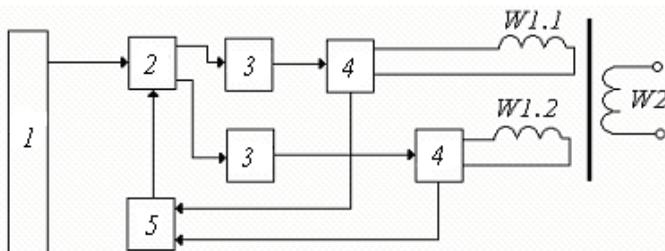


Рис. 1. 1 – блок управления, 2 – блок распределения нагрузки, 3 – индивидуальный инвертор, 4 – датчик тока, 5 – сумматор

Проведенный анализ аппаратных затрат на реализацию данной схемы показал, что этот путь более целесообразен по сравнению со схемой из нескольких параллельных инверторов.

### Литература

1. **Королев А.Н.**, Куликов К.В., Голубев А.Н. и др. Устройство для управления асинхронным двигателем с расщепленными фазными обмотками. АС.1317633 от 15.02.1987 г.

УДК 621.321

А.Н. МЯСНИКОВ, ст. преподаватель, В.Г. ТИТОВ, д.т.н., профессор,  
В.С. НАУМОВ, д.т.н., профессор  
(НГТУ)

## Исследование тепловых процессов в высокочастотном инверторе тока для индукционных установок

Расширенный частотный диапазон (от 10кГц до 200кГц) преобразователей, построенных на основе MosFet и IGBT транзисторов, позволяет модернизировать электронные ламповые генераторы. Исследования позволили получить зависимость максимально допустимого тока коллектора от частоты переключения транзистора при заданной средней температуре кристалла.

Общая энергия потерь как сумма динамических и статической составляющих:

$$E_0 = I_{\max} \cdot U_1 \cdot \left( \frac{1}{\omega_d} - \frac{\sin(\omega_d \cdot t_r)}{\omega_d^2 \cdot t_r} \right) + I_{\max} \cdot U_{\text{cond}} \cdot \left( \frac{\cos(\omega_d \cdot t_r)}{\omega_d} - \frac{\cos(\omega_d \cdot t_{\text{losk}})}{\omega_d} \right), \quad (1)$$

Средняя мощность потерь:

$$P_{AV} = f_t \cdot \left( I_{\max} \cdot U_1 \cdot \left( \frac{1}{\omega_d} - \frac{\sin(\omega_d \cdot t_r)}{\omega_d^2 \cdot t_r} \right) + I_{\max} \cdot U_{\text{cond}} \cdot \left( \frac{\cos(\omega_d \cdot t_r)}{\omega_d} - \frac{\cos(\omega_d \cdot t_{\text{losk}})}{\omega_d} \right) \right), \quad (2)$$

Выражение для максимально допустимого действующего тока коллектора в зависимости от частоты переключения транзистора при заданной средней температуре кристалла:

$$I(f_t) = \frac{T_{J(AV)} - T_s}{\sqrt{2} \cdot \left( \frac{P_{AV}}{I_{\max}} \right) \cdot (R_{\text{ThJC}} + R_{\text{ThCS}})}, \quad (3)$$

Условием определения максимальной частоты принята величина отношения периода колебаний контура к периоду работы транзистора:

$$T_d = T_t - 2 \cdot t_0, \\ \text{per} = \frac{T_d}{T_t} = \frac{T_t - 2 \cdot t_0}{T_t} = 1 - 2 \cdot f_t \cdot t_0, \quad (4)$$

Задавшись значением длительности бестоковой паузы и коэффициентом per можно определить величину максимальной рабочей частоты транзистора:

$$f_{t\max} = \frac{1 - \text{per}}{2 \cdot t_0}, \quad (5)$$

Изменения теплового состояния кристалла транзистора влияют на пропускную способность транзистора, при повышенных рабочих частотах инвертора. Что вызывает экспоненциальное уменьшение рабочего тока с ростом частоты коммутации ключей.

## Условие работы тиристоров в широтно-импульсном преобразователе постоянного напряжения

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения, выполненные на тиристорах, применяются для электроэрозионной обработки материалов [1]. Исследование вольт-временных характеристик эрозионного промежутка приведено в работах Лившица А.Л. и др. авторов, в которых показано, что в первом приближении эрозионный промежуток можно представить против-ЭДС  $E_3$ .

Схема исследуемого генератора импульсов приведена на рис.1.

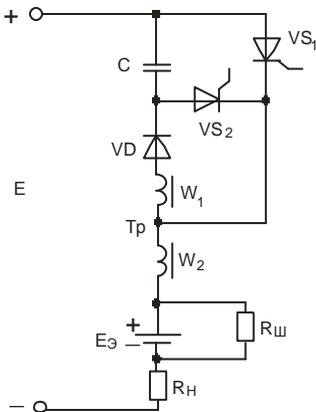


Рис. 1. Схема преобразователя:  $VS_1$  – рабочий тиристор;  $VS_2$  – коммутирующий тиристор;  $R_H$  – токоограничивающее сопротивление;  $E_3$  – против-Э.Д.С. нагрузки;  $R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление, замыкающее контур тока при отсутствии электрического разряда в промежутке

В задачу исследования входит определение следующих показателей работы генератора импульсов: 1) времени, предоставляемого на восстановление управляемости тиристоров  $VS_1$  и  $VS_2$ ; 2) максимального напряжения на конденсаторе  $C$ , тиристорах и диоде  $VD$ ; 3) токов вентилялей.

Анализ работы проведен для первого периода работы, который разбит на несколько участков. На некоторых участках переходные процессы могут носить как аperiodический, так и колебательный характер. Для одного из участков определено время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристора  $VS_1$ , который находится в более тяжелых условиях, чем тиристор  $VS_2$ .

На основании анализа нескольких участков работы построены зависимости искомых величин в относительных единицах (времени восстановления, напряжения, токов), которые используются для выбора параметров преобразователя.

## **Исследование алгоритмов микропроцессорного управления тиристорами машины контактной сварки**

На кафедре ТОЭЭ ведется разработка микропроцессорного устройства управления для машины контактной сварки. В число задач, решаемых микроконтроллером, входит регулировка сварочного тока изменением угла открывания тиристорov, включенных последовательно с первичной обмоткой сварочного трансформатора. Микроконтроллер обнаруживает моменты смены знака ведущего напряжения, отсчитывает от них определенное время и выдает импульс, открывающий тиристоры.

Как показано в [1], регулирование сварочного тока сильно осложняется активно-индуктивным характером цепи. Устройство управления должно учитывать, что диапазон допустимых изменений угла открывания тиристорov зависит от коэффициента мощности машины контактной сварки.

С целью отладки алгоритмов микроконтроллера, регулирующих ток, была разработана математическая модель, включающая источник питания, активно-индуктивную нагрузку, тиристорный ключ и микроконтроллер, обрабатывающий алгоритм управления. В основе модели лежит дифференциальное уравнение силовой цепи, дополненное логическими условиями, учитывающими закрытие тиристорov при переходе тока через ноль. Алгоритм микроконтроллера сводится к дополнительным логическим условиям, встраиваемым в модель.

Исследования на модели показали, что автоматическая подстройка под коэффициент мощности цепи достигается, если за ведущее напряжение принять напряжение на тиристорах, как это сделано в [2]. Однако при этом в токе возникает апериодическая составляющая, подмагничивающая магнитопровод трансформатора.

Предложены алгоритмы управления, снижающие одностороннее подмагничивание. Испытания на математической модели подтвердили получение положительного эффекта – снижения апериодической составляющей тока в первичной обмотке сварочного трансформатора при сохранении широкого диапазона регулировки тока.

### **Литература**

1. **Рыськова З.А.**, Федоров П.Д., Жимелева В.И. Трансформаторы для электрической контактной сварки. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 424 с.
2. **Регулятор** контактной сварки РКС–502. Паспорт / ОАО «Фирма СЭЛМА». – Симферополь. – 17 с.

## **Особенности исследования динамики работы трансформаторов с использованием структурно-динамических схем**

Структурно-динамический анализ широко применяется в теории автоматического управления и его использование для анализа работы трансформатора вполне обоснованно, так как позволяет рассмотреть режимы работы трансформатора в динамике при передаче электрической энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную с учетом характера нагрузки.

Из уравнений электрических процессов в трансформаторе, приведенных с помощью преобразования Лапласа к операторной форме [1], определяются передаточные функции трансформатора и строятся структурно-динамические схемы. В зависимости от характера нагрузки (активной, емкостной, индуктивной, активно-индуктивной и т.д.), которая в реальных условиях изменяется по случайному закону в зависимости от подключения или отключения потребителей, динамика работы трансформатора также меняется. Моделирование структурно-динамических схем в программах SIAM, MATLAB и практические расчеты позволяют определить динамические характеристики режимов работы трансформатора.

Установлено, что самый простой вид передаточной функции по току нагрузки, соответствующий пропорциональному звену будет в случае, когда нагрузка трансформатора является индуктивной или наиболее близка к ней. Этого можно добиться путем введения в выходные электрические цепи трансформатора дополнительных корректирующих элементов. В этом случае угол сдвига фаз между токами первичной и вторичной обмоток трансформатора будет равен 180 градусам или близок к этому значению. При этом коэффициент передачи трансформатора остается постоянным и в выходном токе исключается появление вторых и четвертых гармоник, что обеспечивает снижение потерь и облегчение теплового режима работы трансформатора.

### **Литература**

1. **Ермаков И.И., Киселев В.В., Гильфанов К.Х.** Методика синтеза нестационарных электрических линий с распределенными параметрами. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2006.

УДК 621.313.001.63

В.А. МАРТЫНОВ, д.т.н., профессор, В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент,  
А.П. НИКИФОРОВ, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Применение программного комплекса MATLAB для моделирования электромагнитных процессов сварочных трансформаторов**

Сварочные трансформаторы, отличаются по конструкции от силовых трансформаторов электроэнергетики. Это связано с тем, что наряду с трансформацией напряжений сварочные трансформаторы выполняют дополнительные функции по стабилизации горения дуги, ступенчатого и плавного регулирования сварочного тока, ограничения эксплуатационных коротких замыканий и др. [1,2,3]. В связи с этим естественно отличие подхода к принципам конструирования и методам расчёта характеристик сварочных трансформаторов. На отличительные свойства характеристик сварочных трансформаторов влияет наличие значительных потоков рассеяния и, как следствие, большой индуктивности в цепи сварочного тока. Её учет с требуемой точностью невозможен без расчёта полей рассеяния [4] либо расчёта поля трансформатора в целом [5]. Поэтому создание математических моделей сварочных трансформаторов с учётом картины магнитного поля является актуальным.

Для решения поставленной задачи наиболее подходит программный комплекс Matlab + Simulink. Данный пакет содержит математический аппарат для осуществления расчетов дифференциальных уравнений, включая метод конечных элементов, методы аппроксимации функций, а также комплекс содержит удобный графический интерфейс пользователя.

В докладе рассмотрены основы применения программного комплекса Matlab + Simulink для моделирования процессов в сварочных трансформаторах, показана эффективность использования в расчетах данного программного обеспечения.

### **Литература**

1. **Оборудование** для дуговой сварки. Справочное пособие. Под редакцией В.В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
2. **Кобозев В.А.**, Коваленко В.В. Сварочные трансформаторы. – Ставрополь, 1998. – 227с.
3. **Патон Б.Е.**, Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 360 с.
4. **Королёв А.Н.**, Мартынов В.А. Универсальная математическая модель сварочного трансформатора: Тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий». – Екатеринбург, 2006.
5. **Мартынов В.А.**, Лебедев В.Д. Моделирование трёхмерных полей сварочных трансформаторов: Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения». – Иваново, 2005.

## Расчет радиальных сил в воздушном зазоре многофазного АД

Одной из актуальных задач, возникающих при создании современных электроприводов переменного тока, является снижение уровня шумов и вибраций исполнительного двигателя. Помимо механических составляющих, шумы и вибрации обусловлены магнитными силами, изменяющимися во времени и пространстве и являющимися функциями конфигурации магнитного поля в воздушном зазоре машины. В асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором (АД) – это радиальные магнитные силы, действующие между статором и ротором, а также переменные составляющие момента на его валу, возникающие вследствие несинусоидальности фазных напряжений и токов при питании от преобразователя частоты.

Эффективным способом улучшения спектрального состава поля в зазоре АД является переход на исполнение его статорной обмотки с увеличенным числом фаз, что не вызывает технических проблем при использовании автономного инвертора. Для углубленного исследования данного подхода к улучшению вибро-шумовых характеристик исполнительного двигателя была разработана математическая модель многофазного АД, базирующаяся на использовании приведенных к  $v$ -м пространственным гармоническим поля спектральных векторов электромагнитных переменных машины. При этом учитывалось, что обмотка ротора выполнена в виде беличьей клетки, число фаз (стержней) которой в общем случае не равно количеству фаз обмотки статора. При практическом использовании модели число фаз и параметры обмотки ротора приводятся к обмотке статора. Используя впоследствии вычисленные переменные ротора, приведенные к обмотке статора, с помощью формул обратных преобразований можно легко найти реальные значения роторных величин, необходимые для расчета поля.

Были получены формулы, позволяющие непосредственно найти распределение магнитного поля и созданных им радиальных усилий вдоль воздушного зазора двигателя, исходя из известных значений компонент спектральных векторов тока статора и ротора, приведенных к  $v$ -м пространственным гармоническим. Были также получены аналитические выражения для расчета пространственных гармонических радиальных усилий.

Полученные результаты могут быть использованы для создания системы управления многофазным АД, в которой устранение наиболее значимых второй и четвертой пространственных гармоник радиальных сил приводило бы к значительному снижению магнитных шумов асинхронной машины.

УДК 62-83

А.Н. ГОЛУБЕВ, д.т.н., профессор, Ф.И. САЙФУЛЬМУЛЮКОВ, магистрант (ИГЭУ)

## **Многофазный синхронный электропривод в аномальных режимах работы**

Высокая надежность электромеханической системы является одним из важнейших требований, выдвигаемых при ее проектировании. Для электроприводов (ЭП) специального назначения, в частности автономных, повышение их функциональной надежности и снижение критичности к параметрам потребляемой от источника мощности приобретают первостепенное значение. Перспективным подходом к решению данной задачи, позволяющим оптимизировать также целый ряд других технико-экономических показателей ЭП, является его реализация на основе исполнительного двигателя переменного тока с увеличенным числом фаз статорной обмотки, в том числе синхронного двигателя (СД). Это связано с принципиальной работоспособностью  $m$ -фазной машины в режимах работы с неполным числом фаз, поскольку при выходе из строя или аварийном отключении некоторого числа из них в двигателе продолжает создаваться вращающееся магнитное поле. Кроме того, существенно снижается влияние на регулировочные характеристики ЭП асимметрии по амплитуде в системе фазных напряжений, характерной при использовании низковольтных автономных источников.

Невозможность при исследовании первого типа аномальных режимов формального перехода на уменьшенное число фаз в симметричном режиме требует наличия адекватной модели, которая может быть получена путем использования следующего приема: на обесточенные фазы подаются напряжения, равные наводимым на них ЭДС от изменяющегося потока, с их последующим учетом в спектральных векторах напряжений, поступающих на входы  $v$ - $x$  подструктур модели СД. Таким образом, предлагаемый подход предполагает введение в расчетную структуру внешнего контура с положительной обратной связью по ЭДС, охватывающего исходную (для симметричного режима) модель  $m$ -фазного СД. Для  $m$ -фазных СД различного исполнения получены аналитические выражения для определения наводимых на обесточенных фазах ЭДС без использования операции дифференцирования в явном виде, что повышает точность расчета.

Исследования второго из указанных типов аномальных режимов работы осуществлялось на базе математической модели  $m$ -фазного СД для симметричных режимов путем задания различных вариантов асимметрии по амплитуде в системе фазных напряжений с последующим сопоставлением результатов моделирования СД одинаковой мощности с различным числом фаз.

В докладе приводятся результаты исследования указанных аномальных режимов.

## Тяговый привод рельсового автобуса

Рельсовый автобус (РА) состоит из одного, двух или трёх вагонов и предназначен для перевозки пассажиров на неэлектрифицированных участках железных дорог, а также может быть применен для городского, пригородного и межрегионального сообщений. В настоящее время на РА устанавливаются дизельные тяговые двигатели с автоматическими гидромеханическими трансмиссиями. При использовании таких трансмиссий практически невозможно улучшение экономических и экологических показателей эксплуатации РА. Одним из путей повышения экологичности и экономичности эксплуатации РА является экономия топлива за счёт использования запасённой кинетической энергии РА при торможении и выбора оптимального алгоритма управления тяговым приводом с учетом рельефа местности.

В настоящее время на РА кинетическую энергию торможения рассеивают в тормозной системе. Одним из способов утилизации кинетической энергии является её преобразование в электроэнергию и сохранение в аккумуляторной батарее (АБ). В результате анализа технико-экономических характеристик различных типов тягового привода РА обоснована перспективность варианта с последовательной гибридной трансмиссией. В этом случае цепочка трансформации кинетической энергии в электрическую начинается с генератора, который является первичным преобразователем энергии. Энергию, выработанную генератором через преобразователь, подают в АБ, где она запасается. Далее с помощью электропривода (ЭП) эту энергию превращают в энергию движения (разгона или движения по ровной поверхности). При этом под генератором подразумевается вентильно-машинный комплекс, состоящий из асинхронной машины, работающей в генераторном режиме и подключенной по переменному току к выпрямителю (инвертору) напряжения. В свою очередь, ЭП включает в себя инвертор (выпрямитель) и асинхронную машину, работающую в двигательном или генераторном режиме.

Предложен алгоритм функционирования системы управления гибридным тяговым приводом на маршруте движения с учетом конкретного рельефа местности, обеспечивающий экономию топлива и повышающий экологические характеристики РА.

Расширение возможностей и эффективности исследования энергетических и регулировочных характеристик тягового привода в направлении оптимизации режимов потребления энергии РА обеспечивает модельный эксперимент на ЭВМ. В докладе приводятся математические описания основных функциональных элементов выбранного варианта построения системы с последовательной гибридной трансмиссией.

## **Повышение стабильности эксплуатационных параметров магнитожидкостных герметизаторов электротехнологического оборудования**

Магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) электротехнологического оборудования должны соответствовать жёстким требованиям по эксплуатационным параметрам. К таким параметрам относятся: высокий ресурс работы, рабочий перепад давлений, пусковой и установившийся моменты трения.

Изменение этих параметров, при эксплуатации МЖГ, связано с процессами диффузии, происходящими в магнитной жидкости (МЖ), которые вызывают перераспределение её концентрации в неоднородном магнитном поле. Интенсивность перераспределения магнитных частиц в МЖ возрастает с увеличением магнитной индукции и градиента. Это приводит к значительному увеличению пускового момента трения МЖГ при длительных перерывах в работе электротехнологического оборудования, что вызывает нарушение работы электропривода герметизируемого вала между двумя средами с разным давлением. В результате нарушается технологический процесс и снижается качество свариваемых изделий.

Одним из путей повышения стабильности эксплуатационных параметров МЖГ является разработка конструкций с регулируемыми величинами магнитного индукции и градиента в рабочем зазоре. При длительных перерывах в работе электротехнологического оборудования, когда отсутствует перепад давлений между двумя средами, значения магнитной индукции и градиента в рабочем зазоре МЖГ снижаются до величины достаточной для удержания МЖ. Расчётные исследования показывают, что снижение максимальной магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ от 1,5 Тл до 0,2 Тл приводит к уменьшению перераспределения МЖ в 5-8 раз. Это позволяет получить требуемый пусковой момент трения для приводов электротехнологического оборудования.

Перед началом технологического цикла значение магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ увеличивают. Уплотнение выходит на режим рабочего перепада давлений.

Разработанные конструкции МЖГ позволяют регулировать величину магнитной индукции в рабочем зазоре в пределах 1:8 и обеспечивают требуемые эксплуатационные параметры электротехнологического оборудования и технологического процесса.

## Форстеритовая керамика из савинских магнезитов

В современных условиях развития производства большое значение имеет применение местного сырья. Форстеритовая керамика, широко используемая для сплавов с металлами (в основном с титаном), имеет высокую механическую прочность на сжатие и изгиб. Данный вид керамики можно использовать для изготовления высоковольтных и высокочастотных изоляторов для электротермических печей, для конструкций, где требуется спай металлов с керамикой.

В качестве основных сырьевых материалов для производства форстеритовой керамики используют онотский тальк, саткинский магнезит, оксид магнезия и другие магнезионосные минералы.

В Иркутской области находится Савинское месторождение кристаллических магнезитов. Это крупнейшее месторождение магнезита в мире: его запасы составляют более 2 млрд т руды (75 % от запасов магнезита РФ). Савинское месторождение - это руды, состоящие на 65–99 % из минерала магнезита. Одно это месторождение способно покрыть все потребности России в магнезите.

В ИрГТУ проводили исследования по использованию савинских магнезитов в производстве форстеритовой керамики. Кроме савинских магнезитов в качестве сырьевых материалов использовали глину, полевой шпат и кварцевый песок. Содержание оксидов в расчетных массах находилось в следующих пределах (масс. %):  $\text{SiO}_2$  37,11 – 43,22;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  8,14 – 16,77;  $\text{MgO}$  38,54 – 45,85;  $\text{CaO}$  1,32 - 1,61;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,99 – 1,09;  $\text{Na}_2\text{O}$  0,25 – 0,42.

Из пресс-порошков полусухим прессованием готовили образцы, которые затем высушивали и обжигали при разных температурах. У обожженных образцов определяли водопоглощение, предел прочности при изгибе, термостойкость, плотность и удельное объемное сопротивление.

Лабораторные испытания показали, что из савинских магнезитов может быть получена форстеритовая керамика при температуре обжига 1200-1250 °С. Водопоглощение опытных образцов 5,71 – 9,25; предел прочности при изгибе 79,04 – 298,67 МПа; плотность 2,09 - 2,45; термостойкость 800 – 1000 °С. Удельное объемное сопротивление исследуемых образцов превышает  $1,5 \cdot 10^6$  Ом·м.

## **Алгоритм программного быстродействующего устройства защиты асинхронных электродвигателей от однофазного режима работы и способы его внедрения в существующие комплексы релейной защиты**

Принцип действия абсолютно селективной защиты асинхронного электродвигателя от обрыва фазы (однофазного режима работы) известен. Однако его аналоговая реализация не была осуществлена, в связи с необходимостью высокоточной фиксации длительностей импульсного сигнала, не обеспечиваемой аналоговыми элементами, выполняющими логическую операцию ВРЕМЯ.

Техническая реализация защиты стала возможной на основе способов обработки информации и технических средств цифровой вычислительной техники, благодаря высокой точности таймеров и микропроцессоров и возможностей достаточно точного вычисления угла сдвига фаз между двумя принужденными составляющими вторичных напряжений и токов электромагнитных переходных процессов в системе электроснабжения – входных сигналов микропроцессорной защиты.

Реализованная программная абсолютно селективная защита асинхронных электродвигателей от однофазного режима их работы, как показал вычислительный эксперимент на ПЭВМ, работоспособна и четко отличает обрывы одной фазы питания электродвигателя от несимметричных коротких замыканий в электрической сети электроснабжения, т.е. является абсолютно селективной.

Встает вопрос о возможности внедрения разработанного программного устройства в существующие комплексы релейной защиты. Для этого алгоритм и программная часть устройства должны удовлетворять требованиям, предъявляющимся к блокам, входящим в состав комплекса релейной защиты и в полной мере выполнять заложенные функции. Составленная программа действует по проработанным алгоритмам, обеспечивая точное срабатывание устройства защиты в составе комплекса релейной защиты.

### **Литература**

1. **Лысенко Е.М.**, Овчаренко Н.И. Быстродействующее устройство защиты асинхронных двигателей от однофазного режима работы // Промышленная энергетика. – 1994. – №12. – С.22-24.
2. **Гимоян Г.Г.** Защита шахтных электродвигателей от работы на 2 фазах. – 1957.
3. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Издательство МЭИ, 2004.

УДК 621.311.016

А.В. МАКАРОВ, к.т.н., Н.А. МАКАРОВ, аспирант, Д.Н. КОКОУЛИН, студент (ИГЭУ)

## **Математическая модель для исследования феррорезонансных явлений на линиях электропередач с поперечной и продольной компенсацией**

Феррорезонанс это автоколебательное явление, возникающее в электрических цепях, содержащих нелинейную индуктивность, емкость и источник синусоидального напряжения с малым внутренним сопротивлением. Схемы с указанным набором элементов, но с более сложной топологией могут возникать в электроэнергетических системах на линиях электропередач при наличии поперечной и продольной компенсации. При определенном составе оборудования в указанных схемах могут возникать феррорезонансные явления, которые вызывают перенапряжения, сверхтоки и ненормальное увеличение гармонических составляющих. Это представляет опасность для энергооборудования и может создать условия для возникновения и развития «цепочечных» аварий. [1].

В докладе приведены материалы по разработке математической модели для исследования феррорезонансных явлений на линиях электропередач при поперечной и продольной компенсации. На основе методов анализа нелинейных электрических и магнитных цепей составлено математическое описание процессов в рассматриваемых феррорезонансных схемах. Для учета волновых процессов линия представлена как цепь с распределенными параметрами. Разработанные модели позволяют проводить исследования в переходных и установившихся режимах, анализировать причины, влияющие на их возникновение и характер протекания этих явлений, величину перенапряжений и токовых перегрузок, а также планировать мероприятия по их предотвращению.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов могут быть построены области «опасных параметров» феррорезонансных схем, позволяющие определять возможность повреждения оборудования в зависимости от режима, схемы и состава оборудования. Достоверность полученных результатов моделирования подтверждается сопоставлением их с режимами реальных случаев феррорезонанса, которые зарегистрированы в энергосистемах России и за рубежом.

### **Литература**

1. **R. Gagnon, P. Viarouge, G. Sybille.** Etude de la Ferroresonance dans un Reseau Compense Serie. Congres Canadien en genie Electrique et Informatique. – IEEE Proceedinds. – P. 447-452, Montreal, septembre 1995.

## **Развитие роботизации сварочного производства**

Роботизация сварочных процессов является естественным продолжением механизации и автоматизации. В отличие от этих средств облегчения труда сварщиков, автоматические манипуляторы имеют несколько степеней подвижности (управляемых координат), снабжены устройствами перепрограммирования управления параметрами режима сварки, вспомогательными и транспортными операциями. Успех развития и внедрения этого сравнительно нового направления в сварочной технике зависит от ряда факторов, из которых основными являются: состояние элементной базы (собственно робототехники), степень готовности сварочных процессов, производственные условия и целесообразность. В сварочном производстве раньше других нашли применение роботы с программным управлением, при работе которых параметры режима сварки не изменяются. К такому типу роботизации пригодна контактная сварка. Виды сварки плавлением (дуговая, лазерная, электронно-лучевая) требуют надежных средств адаптации. Первый в СССР опытный образец промышленного робота для контактной сварки был создан в 1975-78 гг. в Институте электросварки им. Е.О. Патона совместно с Горьковским автозаводом. Промышленные роботы такого типа (ИЭС-690) представляют собой стационарную автоматическую машину, на манипуляторе которой укреплены клещи для контактной сварки. Наибольшую трудность при роботизации сварочного производства встретили процессы сварки плавлением, требующие надежных систем слежения и управления состоянием сварочной ванны и формированием соединения. Разработано несколько способов слежения и соответствующих программ управления, однако проблема эта до конца не решена. Наиболее выгодно автоматизировать сварку изделий со швами сложной формы или с большим количеством коротких швов в разнообразном пространственном расположении. При этом пришлось решать задачу геометрической адаптации, обеспечивать достаточную точность позиционирования, стабильность положения изделия. Развитие роботизации привело к требованиям учитывать особенности производства при проектировании изделия, оснастки и др. В автомобиле-, судостроительных и других зарубежных фирмах нашли применение сотни тысяч сварочных и сборочно-сварочных роботов различных систем. Так в Великобритании разработаны программы гармоничных движений и аппаратное обеспечение, позволяющее соединять контроллеры двух роботов, один из которых манипулирует сварочной горелкой, а другой – свариваемым изделием. В настоящее время роботизация сварочного производства основывается на оборудовании с электронными схемами, позволяющими регулировать не только основные сварочные параметры, но и задавать их соотношения, близкие к оптимальным, автоматически выполнять операции, направленные на достижения высокого качества сварки.

УДК 621. 791.927

А.Н. КОРНИЕНКО, к.т.н., Н.А. МАКАРЕНКО, к.т.н., Н.А. ГРАНОВСКИЙ, н.с.  
(ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев)

## **Однофазный источник питания для плазма-МИГ наплавки**

Процесс плазма-МИГ наплавки требует применения как минимум двух источников питания – плазменной дуги и дуги плавящегося электрода, в случае наличия в плазмотроне двух неплавящихся электродов (например при наплавке порошковой плющенкой) – необходим третий источник питания – для питания плазменной дуги второго неплавящегося электрода. Наличие двух-трех источников питания усложняет и удорожает установку, делает ее громоздкой и неудобной в эксплуатации.

В связи с этим был разработан универсальный источник питания, предназначенный для питания дуги плавящегося электрода, а также двух плазменных дуг, горящих с неплавящихся электродов плазмотрона.

С целью удешевления источника питания выполнен по однофазной схеме. Применение однофазной схемы исключает тиристорное регулирование тока и напряжения из-за появления больших бестоковых пауз, резко снижающих стабильность горения дуги и отрицательно сказывающихся на процесс наплавки. В связи с этим для регулировки тока и напряжения были применены дроссели насыщения.

Дроссели насыщения позволяют создать простые, надежные и легко обслуживаемые в заводских условиях схемы управления, в то же время в их обмотках управления индуцируется ЭДС второй гармонической составляющей, нарушающей работу схем управления и ухудшающей регулировочные характеристики. Обычно для ликвидации тока второй гармонической составляющей (100 Гц) в цепь обмоток управления дросселей насыщения включается так называемый запирающий дроссель с большой индуктивностью и малым активным сопротивлением обмотки, что позволяет снизить ток второй гармонической составляющей до минимального значения. Однако масса и габариты запирающего дросселя превосходят эти показатели для самого дросселя насыщения. Кроме того в схемах с дросселями насыщения удобно осуществлять обратные связи по току и напряжению с помощью дополнительных обмоток управления – обмоток обратной связи, что существенно упрощает конструкцию источников питания. В этом случае и в цепь обмоток обратной связи необходимо включать запирающий дроссель.

В связи с вышеизложенным, была предложена схема включения дросселей насыщения без запирающего дросселя.

Дроссель насыщения выполнялся из Ш-образного железа, на крайних ядрах которого наматывались рабочие обмотки, а на среднем – обмотки управления и обратной связи. При этом в цепь переменного

тока включались два меньших дросселя насыщения вместо одного большого, требуемого по расчету. Для цепи плазменной дуги такие дросселя включались последовательно, а для цепи дуги плавящегося электрода – параллельно. При этом рабочие обмотки двух дросселей включались синфазно, а обмотки управления противофазно. Также противофазно включались обмотки обратной связи. Следует отметить, что для эффективного подавления второй гармонической составляющей в обмотках управления параллельно соединенных дросселей насыщения необходимо обеспечить равенство токов в их рабочих обмотках, поэтому параллельное соединение шин рабочих обмоток в этом случае лучше выполнить сваркой.

Обмотки управления во всех случаях соединяются последовательно, что приводит к взаимоуничтожению ЭДС второй гармонической составляющей. Измерения показали, что при таком соединении ЭДС второй гармонической составляющей для пары дросселей насыщения измеряется десятками милливольт.

Обратная связь по току дуги осуществляется в цепях питания плазменных дуг, по напряжению – в цепи питания дуги плавящегося электрода. Выпрямление переменного тока производится выпрямителями, собранными по мостовой схеме, на выходе которых установлены LC фильтры. Силовой трансформатор источника питания имеет O-образную стержневую конструкцию, на одном из стержней намотано 80 % первичной обмотки, поверх которой намотана вторичная обмотка для питания дуги плавящегося электрода, на противоположном стержне намотано 20 % витков первичной обмотки, по краям которой намотаны обмотки питания цепей плазменных дуг.

Такая конструкция трансформатора обеспечивает получение жестких характеристик для питания дуги плавящегося электрода и падающих для плазменных дуг.

#### Выводы

1. Применение однофазной схемы универсального источника питания для плазма-МИГ наплавки с регулировкой тока и напряжения дросселями насыщения упрощает конструкцию источника питания, делает его ремонтнопригодным в условиях предприятий, эксплуатирующих установку плазма-МИГ наплавки.

2. Применение в цепи переменного тока двух дросселей насыщения рабочие обмотки которых включены синфазно, а обмотки управления последовательно противофазно позволяет подавить ток второй гармонической составляющей в цепях обмоток управления.

**Подсекция «ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ»**

УДК 621.328: 666.015.45

Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор, А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,  
Д.В. СЕМЁНОВ, инженер  
(ИГЭУ)**Оценка эффективности обработки увлажнённых изделий при повышенных частоте электрического тока и давлении окружающей среды**

Электроразогрев материала токами ультразвуковой частоты является с технической точки зрения весьма удобным способом тепловой обработки различных изделий в процессе их изготовления [1]. В некоторых случаях эта обработка должна производиться при температурах, превышающих температуру кипения воды, например, для повышения производительности технологического процесса или достижения необходимого эффекта (полимеризации связующего). Если обрабатываемое изделие содержит влагу, то при такой обработке происходит её закипание, что, как правило, значительно ухудшает качество этого изделия.

Преодолеть указанное препятствие можно увеличением давления окружающей среды (воздуха), так как при этом, как известно, увеличивается температура кипения воды. Для исследования эффективности электротепловой обработки различных материалов и изделий токами повышенной частоты при температурах превышающих 100 °С разработан, изготовлен и налажен лабораторный стенд. Стенд содержит камеру высокого давления, где располагается испытуемый объект, компрессор и источник регулируемого переменного напряжения с частотой 10-50 кГц, которое прикладывается к объекту. Максимальное давление в камере составляет 0,6 МПа, что позволяет повысить предельную температуру тепловой обработки без закипания воды до 130 °С. Выполнены эксперименты по электротепловой обработке различных изделий и материалов, которые подтвердили целесообразность использования повышенного давления окружающей среды. Выявлены особенности тепловой обработки некоторых материалов, например, при обработке бетона большое значение имеет управление скоростью снижения температуры после завершения обработки. Получены сведения о характере изменения различных электрофизических и других параметров использованных материалов и изделий в процессе электротепловой обработки.

**Литература**

1. **Разработка** высоковольтного оборудования и технологии электротепловой обработки изделий токами ультразвуковой частоты / О.А. Баженов, Ю.А. Митькин и др. // Сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 07-09.02.2006. – Санкт-Петербург, Россия. – Т. 5. – С.317-318.

## **Методология исследования перспективности использования электрофизических и электротехнологических процессов и установок в различных отраслях народного хозяйства**

К настоящему времени получили развитие и достаточно широкое применение перспективные электротехнологические и электрофизические процессы и установки: лазерные технологические установки, электроплазменные установки, ускорительная техника электротепловая обработка различных изделий и объектов и др. Несмотря на их очевидные технические и технологические преимущества, не наблюдается бурного распространения таких процессов и установок в различных отраслях народного хозяйства.

В результате изучения потребностей и перспектив использования таких процессов и установок на действующих предприятиях различного профиля установлено, что важнейшим препятствием на пути внедрения новых технологий является отсутствие достоверных сведений о технико-экономических показателях и других показателях эффективности с возможностью их прогнозирования на период 10-20 лет (срок службы технологического оборудования).

В настоящее время существует и применяется теоретическое моделирование развития предприятий и прогнозирования их показателей, которое может быть адаптировано к задачам внедрения электротехнологических и электрофизических процессов и установок. Анализ таких методов показал, что одним из важнейших факторов, определяющих показатели развития такой новой техники, является изменение во времени, в дальнейшем, стоимости электроэнергии (тарифов). Это объясняется высокой долей стоимости электроэнергии в технологической себестоимости. Например, при использовании лазерной техники эта доля достигает 20-40 %, а в процессах электротепловой обработки – 60 % и более. Кроме того, стоимость электроэнергии косвенно входит и в другие составляющие и показатели. Прогнозирование тарифов на электроэнергию является сложной задачей из-за неопределённости в направлении дальнейшего развития электроэнергетики.

Можно сделать вывод, что обязательной составной частью математической модели для определения показателей развития электротехнологических и электрофизических процессов и установок является определение показателей развития электроэнергетики для наиболее вероятных сценариев этого процесса. В настоящее время разработана структура и фрагменты этой модели, получены обнадеживающие результаты.

В.И. БОБЫЛЁВ  
(АО «Домостроительная компания»)  
Г.Н. ЗАКИНЧАК, д.э.н., профессор  
(ИГАСА)  
А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## К вопросу об эффективности применения электротепловой обработки бетона на предприятии крупнопанельного домостроения

В настоящее время нет сомнений в технической возможности и целесообразности использования различных вариантов электротепловой обработки бетона в строительстве и при изготовлении различных железобетонных изделий [1,2]. Однако, недостаток сведений о технико-экономической (и других показателей) эффективности сдерживают внедрение электротепловой обработки железобетонных изделий взамен традиционных способов (обработка паром, продуктами сгорания газа) на предприятиях, производящих такую продукцию.

С целью устранения указанного недостатка выполнен анализ производственных издержек, структуры себестоимости и других показателей предприятия крупнопанельного домостроения за последние несколько лет. На основании этого разработана методика оценки и исследования технико-экономических и других показателей эффективности такого производства при использовании традиционного способа тепловой обработки паром и двух способов электротепловой обработки: токами промышленной частоты и токами ультразвуковой частоты. Методика предусматривает возможность прогнозирования изменения показателей на ближайшие 15-20 лет. Это обусловлено тем, что такая замена способа тепловой обработки бетона потребует значительных капиталовложений. Поэтому для принятия обоснованного решения о модернизации производства необходима оценка её эффективности в будущем на срок службы технологического оборудования. Выполненные расчётные оценки позволяют сделать выводы об условиях наиболее эффективного применения электротепловой тепловой обработки в производственном цикле.

### Литература

1. **Энергосберегающие** технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / С.М. Трёмбицкий / Бетон и железобетон. – 2004. – №6.
2. **Исследование** параметров электротепловой обработки бетона токами промышленной и ультразвуковой частоты / В.И. Бобылёв и др. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2006. – С.5.

## **Исследование суточной механической прочности бетона после электротепловой обработки токами различной частоты**

Выполненные исследования показали техническую возможность и целесообразность использования электроразогрева бетона токами ультразвуковой частоты для тепловой обработки железобетонных изделий в процессе их изготовления [1]. Для реализации такой технологии необходимы знания о влиянии различных факторов на суточную механическую прочность бетона (прочность на сжатие спустя сутки после укладки свежего бетона в опалубку, вибро- и тепловой обработки). Суточная прочность должна быть не ниже отпускной прочности (70 % марочной), что позволяет производить распалубку железобетонных изделий и складировать их.

Выполнены эксперименты по электротепловой обработке образцов бетона 100x100x100 (мм) марки 250 токами с частотой 20 кГц и 50 Гц на лабораторной установке и по методике, описанной в [1], с определением суточной прочности. В опытах были использованы два типа форм для изготовления и обработки образцов: формы первого типа изготовлены из оргстекла толщиной 6 мм, формы второго типа изготовлены из водостойкой ламинированной фанеры толщиной 18 мм и снаружи снабжены теплоизоляцией из пенопласта толщиной 20 мм.

В результате экспериментов установлено, что суточная механическая прочность образцов бетона возрастает практически по линейному закону с увеличением длительности изотермической стадии электротепловой обработки. Однако, при достижении прочности, равной 80 % марочной, рост прекращается и прочность остаётся неизменной на этом уровне. Очень сильное влияние на механическую прочность оказывает скорость остывания образца после завершения тепловой обработки. Например, при использовании форм из оргстекла (скорость остывания превышает допустимое значение) длительность изотермической стадии для получения отпускной прочности в 2,5-3 раза больше аналогичного параметра при использовании форм с термоизоляцией. Получены электрофизические характеристики исследованных образцов бетона.

### **Литература**

1. **Исследование** параметров электротепловой обработки бетона токами промышленной и ультразвуковой частоты / В.И. Бобылёв и др. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2006. – С.5.

УДК 621.374

В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., доцент, Г.В. БЕЛЯЕВ, ассистент,  
А.Н. КРАЙКОВ, аспирант, Т.В. ЧАСТУХИНА, студент  
(ИГЭУ)

## Применение размагничивания в мощных импульсных трансформаторах с большой скважностью импульсов

Использование импульсных трансформаторов (ИТ) для генерации униполярных импульсов осложняется наличием остаточной намагниченности в магнитном материале, величина которой достигает 1,1 Тл. Изменение магнитной индукции при повторном намагничивании сердечника ограничено величиной примерно 0,7 Тл, что в 2,5 раза ниже, чем при работе на переменном напряжении.

В связи с этим при проектировании импульсных трансформаторов применяют два подхода: введение воздушного зазора в сердечник и размагничивание. Возможно также применение сердечника без размагничивания.

В данной работе произведено сравнение ИТ с размагничиванием и импульсного трансформатора без размагничивания для технологического ускорителя ионов. Импульсная мощность трансформатора 1 МВт, скважность импульсов 10000. Показано, что ИТ с размагничиванием имеет значительно меньшие габариты и массу, чем трансформатор без размагничивания. Рекомендована следующая методика выбора тока размагничивания. Снимается петля гистерезиса на частоте размагничивания. Амплитуда тока размагничивания рассчитывается по формуле

$$I_p = \frac{H_c}{W_p}, \quad (1)$$

где  $H_c$  – коэрцитивная сила сердечника,  $W_p$  – число витков обмотки размагничивания.

Использование размагничивания трансформатора, рассчитанного по данной методике, позволяет увеличить магнитную индукцию в сердечнике в 1,5 раза по сравнению с трансформатором без размагничивания. Это позволяет в 1,5 раза уменьшить объем сердечника.

Увеличение тока размагничивания сверх рекомендуемой величины нецелесообразно, так как рост приращения магнитной индукции с ростом тока размагничивания сильно замедляется. Полное размагничивание сердечника до максимально возможной отрицательной остаточной индукции возможно при токах размагничивания, в 10 раз превышающих ток, рассчитанный по формуле (1). При этом магнитная индукция увеличится в 2,6 раза. Таким образом, эффективность размагничивания падает.

## **Особенности восстановления свойств эксплуатационного трансформаторного масла в сильном электрическом поле**

Твердые частицы примесей появляются в жидком диэлектрике во время изготовления и эксплуатации высоковольтных аппаратов. Они резко снижают электрическую прочность электроизоляционных жидкостей.

Для восстановления отработанных масел обычно соблюдается следующая последовательность методов очистки: механический, для удаления из масла свободной воды и твердых загрязнений; теплофизический (выпаривание, вакуумная перегонка); физико-химический (коагуляция, адсорбция).

Интерес представляют слабо изученные методы модификации трансформаторного масла в электрическом поле, применяемые для очистки диэлектрических жидкостей. Новым направлением в развитии способов восстановления трансформаторного масла является обработка его импульсными разрядами. Суть метода заключается в том, что электрическая прочность трансформаторного масла возрастает с увеличением числа предварительных пробоев до определенного предела, что объясняется разрушением твердых частиц примесей в масле.

Основными преимуществами методов очистки трансформаторного масла в электрическом поле являются высокая эффективность (с использованием других методов очистки зачастую регенерированное масло пригодно лишь на более низкие классы напряжения), технологическая простота, небольшие временные затраты, дешевизна, экологическая безопасность.

В настоящее время ведутся работы над конструированием и производством электрофильтров для очистки диэлектрических жидкостей: смазочные и гидравлические масла, дизельное топливо и др. Фактически отсутствуют исследовательские работы по применению электростатических способов очистки трансформаторного масла.

Существующие технические средства не в полной мере используют электрофизические процессы, характеризующие поведение частиц в неоднородном электрическом поле. С учетом этого важно изучить поведение механических частиц в неоднородном электрическом поле и на этой основе предложить новые принципы построения технических средств для более эффективной электроочистки эксплуатационных трансформаторных масел.

## Оценка влияния коллоидных частиц на характеристики твёрдой маслосодержащей изоляции

В настоящий момент времени в эксплуатации находится большое количество электроэнергетического высоковольтного маслонаполненного оборудования (МНО), в значительной степени определяющего надёжность передачи и распределения электрической энергии. Основной рабочей электроизоляционной средой в этих аппаратах является трансформаторное масло, к качеству которого предъявляются повышенные требования.

При работе МНО происходит постепенное ухудшение электроизоляционных свойств масла за счёт увеличения концентрации и размеров содержащихся в нём металлосодержащих коллоидных частиц различной природы. Наиболее ярко этот процесс проявляется в высоковольтных вводах конденсаторного типа силовых трансформаторов. В результате коагуляции коллоидные частицы имеют размеры от 10 до 1000 нм, что приводит к значительному увеличению тангенса угла диэлектрических потерь трансформаторного масла, снижению его электрической прочности и образованию на поверхности твёрдой изоляции осадка, по которому со временем развиваются частичные и ползущие разряды.

Таким образом, необходимо постоянно или с некоторой периодичностью производить контроль трансформаторного масла работающего электроэнергетического оборудования по концентрации и размеру содержащихся в нём коллоидных частиц, чтобы не допустить образования достаточно плотного (концентрированного) осадка.

Выполненные оценочные расчёты характерных соотношений концентраций и размеров коллоидных частиц показали, что при среднем времени эксплуатации МНО 25 лет на процесс формирования начального осадка влияют частицы диаметром менее 200 нм, а на формирование осадка, по которому возможно развитие разряда – менее 100 нм. Так, при наличии в масле только частиц диаметром 80 нм и плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$  их концентрация для формирования начального осадка должна быть около  $0,075 \text{ мг/кг}$  ( $2 \cdot 10^{14} \text{ 1/м}^3$ ), а для формирования «предразрядного» осадка –  $0,65 \text{ мг/кг}$  ( $1,4 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$ ). Полученные значения концентраций и диапазона диаметров заряженных частиц имеют совпадения по порядку величин с данными эксплуатационных испытаний. Так же на основе выполненных исследований показано, что при увеличении концентрации частиц в объёме масла время образования осадка уменьшается, однако увеличение радиуса этих частиц приводит к возрастанию времени образования осадка.

УДК 621.314.21: 621.3.048

Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор, Д.В. СОКОЛОВ, аспирант (ИГЭУ)

## Повышение уровня технического состояния уплотнительных узлов силовых трансформаторов

Наблюдения за работой уплотнений силовых трансформаторов в условиях эксплуатации показывают на наличие процессов старения уплотнительной резиновой прокладки под воздействием трансформаторного масла и внешних атмосферных условий. Основным параметром, определяющим герметичность уплотнений, является контактное давление, которое после установки уплотнений со временем уменьшается вследствие старения материала прокладки, что может привести к вытеканию трансформаторного масла через уплотнительный узел. Можно предположить, что при этом высота капилляров в пористом слое на границе раздела фланец-резина превысит значение  $h_{кв}$ , при котором наступает режим течения трансформаторного масла через уплотнение.

Для устранения вытекания масла через уплотнительный узел необходимо дополнительно поджать резиновую прокладку стягивающими фланцами. В этом случае происходит уменьшение высоты капилляров от  $h_{кв}$  до  $h_{кг}$ , при которой снова соблюдается условие герметичности бака трансформатора. При этом значениям высот капилляров  $h_{кг}$  и  $h_{кв}$  соответствуют значения относительной деформации эластичной прокладки  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_b$ . По завершении процесса дополнительного сжатия резиновой прокладки значение её новой относительной деформации, обеспечивающей требуемую по условиям герметизации бака  $h_{кг}$ , будет  $\varepsilon_r^H$ , причем  $\varepsilon_r^H > \varepsilon_r$ .

Здесь важно определить коэффициент усадки  $K_y^H$  при дополнительном сжатии уплотнительной прокладки

$$K_y^H = \frac{1 + \varepsilon_b - 2\varepsilon_r}{1 - \varepsilon_r}$$

В соответствии с найденным по данному выражению значением коэффициента усадки следует сжать резиновую прокладку, что обеспечит требуемую маслостойкость и герметичность бака силового высоковольтного трансформатора. Это также позволит избежать излишнего сжатия уплотнительной прокладки, которое имеет место в эксплуатации.

В результате данный метод может обеспечить требуемую эксплуатационную надежность работы уплотнительного узла бака силового высоковольтного трансформатора и одновременно будет способствовать увеличению срока службы резиновой прокладки.

УДК 621.314.21: 621.3.048

А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., ст. преподаватель, Д.В. СОКОЛОВ, аспирант (ИГЭУ)

## **Алгоритм программы расчета уплотнительных узлов высоковольтного маслонаполненного оборудования**

В настоящее время в электроэнергетике эксплуатируется большое количество высоковольтного трансформаторного оборудования, выработавшего свой нормативный ресурс. Однако в сложившихся экономических условиях замена этого оборудования за короткий срок затруднительна, поэтому одной из важнейших задач электроэнергетики в настоящее время является поддержание работоспособности электрооборудования после его расчетного срока службы.

Опыт эксплуатации высоковольтного маслосодержащего оборудования в электроэнергетике свидетельствует о том, что основной причиной его отказов является снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции, обусловленное, в первую очередь, натеканием влаги в бак оборудования через уплотнительные узлы.

Оценить степень влияния уплотнений на увлажнение изоляции техническими средствами сложно, поэтому на основе разработанной на кафедре ВЭТФ математической модели была разработана программа расчета уплотнительных узлов, позволяющая определить необходимые степени сжатия уплотнительной резины для обеспечения герметичности баков высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Алгоритм программы может быть представлен последовательностью следующих действий:

- вводятся геометрические размеры всех уплотнений, а также физико-механические параметры уплотнительных узлов;
- выполняется расчет необходимой степени сжатия уплотнительной резины по условию герметичности бака трансформатора;
- выполняется расчет маслоплотности уплотнительных узлов на основе ранее разработанной модели;
- в заключительном блоке программы выполняется расчет увлажнения внутренней изоляции за указанный период времени или прогнозируется его изменение в будущем;
- результаты расчета и рекомендации по изменению степени деформации уплотнительной резины отображаются в отдельном окне программы.

Таким образом, разработанная компьютерная программа позволяет рассчитывать требуемые параметры уплотнительных узлов как на стадии проектирования оборудования, так и на стадии эксплуатации. Кроме того, программа позволяет более точно оценить требуемую степень сжатия резиновой прокладки.

## Оценка влияния внешних сжимающих усилий на профиль уплотнительной прокладки в баке трансформатора

Уплотнение бака трансформатора осуществляется с помощью эластичной прокладки, сжатой с двух сторон плоскими металлическими фланцами. Уплотнительный узел представляет собой замкнутый контур, причем длина его периметра для трансформаторов высших классов напряжений измеряется десятками метров. При сжатии прокладки фланцами происходит её деформация. В качестве уплотнительной прокладки используется резина, представляющая собой линейное упругое изотропное тело, причем её ширина  $b$  существенно больше высоты  $a$ . В этом случае наблюдается плоская деформация, когда имеют место перемещения по вертикальной оси и оси, перпендикулярной длинной стороне прокладки. В направлении длинной стороны прокладки перемещения отсутствуют, но присутствует внутреннее напряжение материала (резина по продольной оси сжимается).

Для оценки профиля боковой поверхности резиновой прокладки рассмотрим поперечное сечение данной прокладки. На основе физических представлений о деформации резиновой прокладки можно отметить, что на боковых поверхностях прокладки смещение резины равно нулю. Поскольку при сжатии прокладки происходит её внедрение во впадины фланцев, поэтому поверхность резины на границах раздела фланец-резина не проскальзывает и точки прокладки, соприкасающиеся с поверхностью металлического фланца, фиксированы.

Если принять, что профиль боковой поверхности резиновой прокладки имеет вид параболы, уравнение для профиля боковой поверхности примет вид

$$\omega = \frac{\mu_p b \varepsilon}{2(1 - \mu_p)} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{(a/2)^2}\right),$$

где  $\varepsilon$  и  $\mu_p$  – относительная деформация и коэффициент Пуассона резиновой прокладки.

Полученное выражение позволяет находить полный профиль боковой поверхности эластичной прокладки при различных сжимающих усилиях (различных  $\varepsilon$ ), что важно для визуального контроля состояния боковой поверхности уплотнительной прокладки в эксплуатации.

УДК 621.314:621.315.6

Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., профессор, А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., ст. преподаватель  
(ИГЭУ)

Ю.А. ЧИСТОВ

(Ивановская генерирующая компания АО «Ивэнэнерго»)

## **Оценка состояния высоковольтного оборудования по результатам эксплуатационного мониторинга**

В электроэнергетике накоплено большое количество результатов по эксплуатационным испытаниям силового высоковольтного оборудования за время 25-30 лет его непрерывной работы. Эта информация должна быть использована при разработке новых методов оценки технического состояния высоковольтного оборудования.

Кафедра ВЭТФ Ивановского государственного энергетического университета совместно с Ивановской генерирующей компанией (ИГК) АО «Ивэнэнерго» организовали совместную специальную научно-техническую группу для изучения вопросов эксплуатации высоковольтного оборудования. Задачами этой группы являются анализ опыта эксплуатации оборудования ИГК АО «Ивэнэнерго» и разработка на этой основе эффективных методов оценки текущего технического состояния изоляции и прогнозирования его изменения по данным эксплуатационного мониторинга.

С этой целью собрана информация по эксплуатационным измерениям для основного высоковольтного оборудования ИГК АО «Ивэнэнерго», которая занесена в электронную базу данных (БД). Структура используемой БД разработана на основе результатов анализа нормативных документов и протоколов испытаний «Ивановской генерирующей компании». БД содержит информацию по испытаниям оборудования, по его повреждениям и ремонтам, а также паспортные данные каждого аппарата.

Предложены основные направления анализа разработанной БД, которые реализуются в программном комплексе анализа технического состояния изоляции высоковольтного оборудования.

Так, была разработана подпрограмма расчета статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла, позволяющая следить за изменением в эксплуатации таких характеристик масла, как минимальное пробивное напряжение масла и коэффициент вариации пробивного напряжения масла. Также была разработана подпрограмма для прогнозирования изменения технического состояния оборудования по изменению основных параметров его изоляции.

Разработка программных комплексов анализа данных эксплуатационных испытаний позволяет более обоснованно определять объем запланированных профилактических испытаний и ремонтных работ для конкретного оборудования.

УДК 621.315.6.001.5

О.А. БАЖЕНОВ, к.т.н., доцент, М.Е. ТИХОВ, к.т.н., доцент,  
С.В. ШИЛОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Работа полимерной изоляции при воздействии импульсного электрического поля**

Вопросы старения материалов при совместном воздействии внешних факторов и импульсного электрического поля в настоящее время мало изучены и практически не освещены в литературе.

Интерес представляет также изучение изменений электрических характеристик, вызванных необратимыми и обратимыми процессами в материалах, и соотношение этих изменений.

Целью исследований являлось определение влияния количества воздействующих импульсов и напряженности импульсного электрического поля на характеристики стеклопластиков, а также оценка изменения пятидесятипроцентного разрядного напряжения и сопротивления образцов стеклопластиков при непосредственном воздействии повышенной влажности окружающей среды. Кроме того, ставилась задача оценки устойчивости стеклопластиков к импульсному разряду по поверхности.

В процессе многоимпульсных воздействий контролировались удельное объемное и удельное поверхностное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, разрядное напряжение по поверхности, напряжение пробоя образцов.

Проводились визуальные наблюдения за состоянием образцов с целью выявления момента образования прогаров, трещин или других разрушений структуры материала в процессе испытаний.

Получено, что разрядное напряжение стеклопластиков при увеличении числа импульсов изменяется незначительно, а значение тангенса угла диэлектрических потерь при этом определяется не только числом воздействующих импульсов, но и напряженностью импульсного поля.

Полученные результаты показывают, что в целом характеристики стеклопластиков при многоимпульсных воздействиях сохраняются на достаточно высоком уровне, старение стеклопластиков определяется числом воздействующих импульсов и напряженностью импульсного поля. Однако при совместном воздействии импульсного поля и внешних факторов картина может существенно меняться вследствие значительного изменения электрических характеристик стеклопластиков при непосредственном воздействии внешних факторов. Таким образом, для объективной оценки работоспособности материалов необходимо проведение испытаний при совместном воздействии импульсного поля и климатических факторов с контролем характеристик непосредственно в испытательной среде.

УДК 621.315.623.027.3.012.001.5

С.Н. ГОРЯЧКИН, к.т.н., профессор, Г.А. ФИЛИППОВ, к.т.н., доцент,  
С.В. ШИЛОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Перспективы использования полых полимерных изоляторов**

Перспективность использования полых изоляторов при разработке опорных изоляционных конструкций на высшие классы напряжения очевидна и связана в первую очередь с их высокой механической прочностью на изгиб.

Существенными недостатками опорных изоляторов с внутренней полостью являются низкие влагоразрядные характеристики таких изоляторов и необходимость защиты внутренней полости от возникновения перекрытий при отпотевании внутренней поверхности изоляторов. Для исключения возникновения перекрытий по внутренней поверхности полых изоляторов разработаны различные защитные мероприятия. Эти мероприятия сложны при реализации, требуют значительных дополнительных затрат, затрудняют эксплуатацию и обслуживание электрооборудования и при этом недостаточно эффективны. Таким образом, разработка новых способов защиты полых изоляторов от возникновения перекрытий по внутренней поверхности при её увлажнении целесообразна. Оба основных недостатка, присущие полым опорным изоляторам, могут быть устранены путем создания изоляторов на основе полимерных композиционных материалов. Учитывая широкие технологические возможности, которые появляются при изготовлении изоляторов из полимерных композиций, естественным является желание использовать для повышения влагоразрядных напряжений по внутренней поверхности увеличения длины пути тока утечки. Такое увеличение может быть осуществлено путем создания внутренних ребер по конструкции и назначению аналогичных наружным. Технология изготовления полых стеклопластиковых изоляторов (например, методом непрерывной намотки) вполне позволяет создать изоляторы подобной конструкции.

Доказано что, создание ребер на внутренней поверхности полых изоляторов существенно повышает влагоразрядное напряжение по внутренней полости.

Влагоразрядное напряжение возрастает как при увеличении вылета внутренних ребер, так и при увеличении удельного числа внутренних ребер на метр изоляционной части изолятора.

Создание ребер на внутренней поверхности полых изоляторов является эффективной мерой борьбы с разрядами по внутренней полости и вполне может обеспечить надежную работу электрооборудования без дополнительной герметизации внутренней полости.

## **К вопросу о выборе ОПН для работы в электрических сетях 110 кВ и выше**

В настоящее время в электрических сетях идет процесс замены физические и морально устаревших вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), как более совершенные аппараты защиты от перенапряжений. При этом полагают, что высоковольтное электрооборудование, тем более с большой степенью износа, будет лучше защищено от всех видов перенапряжений и надежность его работы повысится. Это действительно будет иметь место, если электрические характеристики ОПН будут соответствовать всем видам воздействий на него в процессе эксплуатации. В противном случае количество аварий в электрических сетях возрастет по причине выхода из строя ОПН или невыполнения ими в должной мере защитных функций.

Правильный выбор ОПН связан с решением довольно сложных проблем технического и организационного характера. В основе выбора лежат рекомендации, изложенные в руководстве по защите от перенапряжений электрических сетей 6–1150 кВ и методических указаниях по выбору ОПН, разработанных под эгидой РАО «ЕЭС России». Разработка и опубликование этих документов является положительным фактом. Однако, они страдают рядом существенных недостатков. В частности, в методических указаниях дается весьма ориентировочная оценка уровня квазиустановившихся перенапряжений при неполнофазных режимах, порой с большим запасом. В методике расчета нет учета насыщения магнитопроводов трансформаторов, она плохо согласована с руководством по защите от перенапряжений. Нет четкости в рекомендациях по выбору энергоемкости ограничителей для установки на ОРУ по схеме «треугольник», «квадрат» и т.п. Для типовых схем можно было бы дать и типовые решения. Среди характеристик ОПН приводятся значения остающихся напряжений при различных токах коммутационных перенапряжений. Однако, ничего не сказано о том, в каких случаях те или иные перенапряжения являются определяющими и как оценить при этом токи, протекающие через ОПН. Эти и другие недостатки затрудняют инженеру-проектировщику правильно выбрать ОПН.

Существует много фирм, выпускающих ОПН, существенно отличающихся по своим характеристикам и качеству. Порой энергопредприятия приобретают ОПН более дешевые, но низкосортные.

Настоятельно назрел вопрос создания ГОСТа на ОПН. Требуется разработка руководства по выбору ОПН с соответствующими методическими рекомендациями и программными продуктами. Все это может быть решено под руководством РАО «ЕЭС России» при участии ведущих ученых и проектных организаций.

## Магнитожидкостные герметизаторы для штока привода контактов элегазового выключателя

Элегаз в выключателях высокого напряжения используется при давлении 0,3-0,45 МПа. Герметичность выключателей должна быть достаточно высокой (утечка через все уплотнения не должна превышать 1 % в год), так как срок их эксплуатации без ревизии составляет 10 лет и более. В ряде конструкций выключателей передача движения от привода к контактной системе осуществляется через шток, который перемещается на 0,2 м со скоростью до 10 м/с. Коммутации выключателя происходят не часто, общее число их за весь срок службы не превышает 10000. Большую часть времени шток находится в неподвижном состоянии. При этих условиях работы магнитожидкостное уплотнение (МЖУ) может улучшить герметичность выключателя, повысить его надежность.

Выполнены исследования герметичности двух конструкций МЖУ на экспериментальном стенде. В цилиндрическом корпусе в центре расположен направляющий подшипник скольжения и система подачи и измерения давления элегаза. Шток проходит через корпус и уплотняется МЖУ на торцах, при этом исключается компрессия элегаза при движении штока. Утечка элегаза определялась по изменению давления в камере между двумя МЖУ. Пневматический привод обеспечивает движение штока с максимальной скоростью 10 м/с при ходе 0,2 м.

В первой конструкции в корпусе полюса между стальными шайбами, образующими неравномерное магнитное поле в зазоре, расположены фторопластовые шайбы, обеспечивающие работу МЖУ при поступательном движении. Вторая конструкция МЖУ отличалась от традиционной для вращательного движения тем, что в каждой полюсной приставке было установлено по одному резиновому кольцу, ограничивающему натекание газа при движении штока.

Исследования показали, что обе конструкции МЖУ обладают примерно одинаковой герметичностью. При неподвижном штоке герметичность не хуже  $10^{-8}$  Па\*м<sup>3</sup>/с, а при движении штока не хуже  $10^{-5}$  Па\* /с. Установлено, что после динамического режима МЖУ восстанавливает уровень герметичности до  $10^{-8}$  Па\*м<sup>3</sup>/с. Видимо, при большей скорости движения МЖУ не работает и герметичность обеспечивается или фторопластовыми шайбами, или резиновыми кольцами. Расчет показывает, что в элегазовом выключателе с объемом камеры 0,05 м<sup>3</sup> из-за утечки через МЖУ давление уменьшится не более чем на 0,1 % в год при допустимой норме 0,5 %. Разработанные и исследованные конструкции МЖУ по герметичности и ресурсу отвечают требованиям элегазовых выключателей.

## Подсекция «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

УДК 621.316.925

В.К. СЛЫШАЛОВ, д.т.н., профессор, Ю.В. КАНДАЛОВ, аспирант  
(ИГЭУ)

### **Концептуальные вопросы использования заземлителей при обеспечении электробезопасности систем газораспределения**

Системы газораспределения, а также газовые емкости применяемые на газозаправочных станциях, являются источником опасности при ударах молнии. В соответствии с «Инструкцией по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» этим сооружениям присвоен специальный уровень надежности защиты от прямых ударов молнии (ПУМ) в пределах 0,9-0,999 в зависимости от тяжести ожидаемых последствий. Комплекс средств молниезащиты газовых емкостей включает в себя устройства защиты от прямых ударов молнии (внешняя молниезащитная система (МЗС)) и устройства защиты от вторичных воздействий молнии (внутренняя МЗС). Внешняя МЗС изолирована от сооружения (отдельно стоящие молниеотводы – стержневые или тросовые, а также соседние сооружения, выполняющие функции естественных молниеотводов). Внутренние устройства молниезащиты предназначены для ограничения электромагнитных воздействий тока молнии и предотвращения искрений внутри защищаемого объекта

При проектировании необходимо учесть меры для осуществления электрохимической защиты, решение о ее необходимости принимается в соответствии с требованиями ГОСТ 9.015.-74 на основании результатов коррозионных исследований, выполняемых с целью выявления на участке строительства сооружения опасности почвенной коррозии или коррозии блуждающими токами, а также определения эффективности работы средств действующей или экспериментальной электрозащиты, для этого применяется протекторная защита, которая является эффективным видом электрохимической защиты подземных сооружений, проложенных в грунтах с удельным электросопротивлением на более 50 Ом·м, при следующих условиях:

- отсутствие блуждающих токов или в случаях, когда блуждающие токи оказывают анодные;

- плотность необходимого защитного тока, определенная расчетными или экспериментальным путем, для сооружений не превышает  $10 \text{ mA/m}^2$ ;

Наиболее эффективно протекторная защита работает в сочетании с изолирующими фланцевыми соединениями и вставками на газопроводах, размещенными на наружной части вводов к потребителям и предназначенными для исключения металлических контактов газопроводов с плохо изолированными и заземленными конструкциями и сооружениями.

УДК 621.316.1

В.К. СЛЫШАЛОВ, д.т.н., профессор, О.А. БУШУЕВА, к.т.н., профессор,  
С. ДАУДИ, аспирант  
(ИГЭУ)

## Анализ состояния городских электрических сетей г. Борж Бу Араррыж и перспектива их развития

Объектом исследования явились распределительные сети напряжением 0,4-30 кВ одного из больших городов республики Алжира (г. Борж Бу Араррыж). Эти сети обладают сложной структурой, большой протяженностью и имеют ряд особенностей, заключающихся в:

- большой плотности электрических нагрузок;
- относительно равномерном распределении нагрузок на ограниченной территории;
- стесненных условиях для выбора трасс линий и площадок для подстанций;
- требованиях высокой надежности электроснабжения.

Был проведен анализ состояния распределительных сетей (схем высшего и внутреннего электроснабжения, схем трансформаторных подстанций, воздушных и кабельных линий).

Выявлено, что распределительные сети выполнены с использованием подземных кабельных линий, которые составляют 85 % протяженности на напряжении 30 кВ. Наиболее распространенными являются кабели с бумажно-пропитанной изоляцией с медными (сечением 70 мм<sup>2</sup>) и алюминиевыми жилами (сечением 120 мм<sup>2</sup>).

Рассмотрены вопросы развития электрических сетей с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В табл. 1 приведены сравнительные характеристики кабелей СПЭ и кабелей с бумажной изоляцией

Таблица 1. Сравнительные характеристики

Характеристики	СПЭ 6-35кВ	бумажно-ропитанная	
		10кВ	35кВ
Длительно допустимая температура, °С	90	70	65
Предельно допустимая температура при протекании тока КЗ, °С	250	200	130
Коэффициент диэлектрических потерь tgδ при 20 °С	0,001	0,008	0,006

Учитывая, что разработаны специальные муфты для осуществления соединений между кабелями, применение кабелей СПЭ в городской электрической сети целесообразно не только при прокладке новых линий, но и при замене существующих.

## О нормировании потерь электрической энергии в современных условиях

Важным показателем рационального и эффективного использования электрической энергии (ЭЭ) при ее передаче и распределении являются потери в электрических сетях. Ранее, как известно, потери ЭЭ в сетях предприятий и организаций рассчитывались на основании годовых отчетов и балансов по электропотреблению, т.е. определялись так называемые *отчетные потери*. Причем в это понятие включались только *технические потери*, состоящие из постоянных и переменных (нагрузочных) потерь.

Проблема снижения потерь ЭЭ в сетях на сегодняшний день является одной из наиболее актуальных в электроэнергетике, но дело не только в уменьшении самих потерь. Для снижения фактического уровня потерь ЭЭ до их экономически обоснованного и документально подтвержденного технологического уровня должно осуществляться их нормирование, т.к. норматив потерь ЭЭ включается в тариф на передачу ее по электрическим сетям и, значит, оплачивается потребителями ЭЭ, подключенными к этим сетям. Таким образом, сверхнормативные потери в сетях – это прямые финансовые убытки электросетевых компаний. Поэтому специалистами предлагается осуществлять нормирование *технологических потерь* ЭЭ, которые включают в себя технические потери с учетом расхода ЭЭ на собственные нужды подстанций и потери, обусловленные погрешностью систем учета электроэнергии.

По расчетам энергетиков экономия от снижения потерь ЭЭ можно было бы использовать в качестве инвестиций, направляемых на техническое перевооружение сетей, повышение их надежности и качества электроснабжения, уменьшение тарифов на ЭЭ и т. п.

Анализ динамики потерь ЭЭ показывает, что в середине 80-х годов XX века они в сетях бывшего Минэнерго СССР составляли 9,2 %, тогда как в 2004 году в сетях АО-энерго достигли в среднем уровня почти 13 %, а в отдельных энергосистемах 20 % и более [1].

Это обстоятельство и проблема нормирования потерь ЭЭ в сетях была рассмотрена на самом высоком уровне, что нашло отражение в Постановлениях Правительства РФ.

### Литература

1. **Воротницкий В.Э.**, Заслонов С.В., Калинкина М.А. Расчет, нормирование и снижение потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям: Учеб.-метод. пособие. – М., 2006.

## Расчет частотных характеристик ВЛЭП 6-10 КВ при учете физических свойств грунта

При разработке и совершенствовании методов и устройств дистанционного определения мест повреждений ВЛЭП первостепенное значение приобретает вопрос достаточно строгого расчета первичных параметров ВЛЭП при учете реальной геометрии линий этого класса напряжения и конечности проводимости грунта. Этот расчет является базовым для построения как цепных, так и полевых математических моделей волновых процессов передачи информации о повреждениях.

В настоящем докладе на основе уравнений Максвелла рассматривается, во-первых, методика расчета комплексного сопротивления проводов марки АС и, во-вторых, проводится расчет электромагнитного поля линии, вычисляются значения постоянной распространения, характеризующие возможные модификации ЭМ волн в линии, определяются параметры волновых каналов, т.е. разрабатывается полевая математическая модель волновых процессов для данной ВЛЭП.

Эта модель в данной работе используется как базовая для построения цепной модели процессов в линии. С этой целью по ней записываются телеграфные уравнения для напряжений и токов в проводах ВЛЭП, вычисляются собственные и взаимные параметры цепной схемы замещения адекватной по своим волновым характеристикам исходной полевой модели, выполняется сравнение полученной модели с цепными моделями традиционных модификаций. Дается оценка точности последних и устанавливается область их допустимого применения.

### Литература

1. **Костенко М.В.**, Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
2. **Слышалов В.К.**, Киселева Ю.А. Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт // Вестник ИГЭУ; вып. 1. – Иваново, 2005. – С. 62-69.

## Колебательная статическая устойчивость электрической системы с регулируемым УПК

Выбор закона регулирования УПК должен обеспечивать устойчивые режимы работы исследуемой системы в требуемом диапазоне изменения передаваемой мощности. Для решения этой задачи необходим метод, позволяющий выявить область изменения коэффициентов, определяющих закон регулирования сопротивление УПК.

Для изучения вопросов анализа колебательной статической устойчивости регулируемой электрической системы состоящей из электростанции, связанной линией электропередачи сверх высокого напряжения, имеющий регулируемое УПК, с мощной системой, в соответствии общепринятой методикой изложенной в [1], составлен характеристический определитель линеаризованной системы уравнений, получено характеристическое уравнение в виде многочлена по степеням «р».

Для анализа колебательной статической устойчивости исследуемой электрической системы определены значения всех частных производных, входящих в выражения для определения коэффициентов характеристического уравнения.

Полученные корни характеристического уравнения при степени компенсации 50% и степени компенсации близкой к зоне самовозбуждения подтверждают результаты, полученные ранее и правильность определение границ зоны самовозбуждения [2].

Исходя из этого можно сделать заключение о том, что данная математическая модель дает возможность анализировать колебательную статическую устойчивость исследуемой электрической системы с регулируемым УПК, и в дальнейшем появляется возможность для определения области значений в плоскости коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , характеризующих зависимость  $X_{УПК}(l)$ , при которых колебательная статическая устойчивость не нарушается. Кроме этого, используя подобный способ анализа статической устойчивости, можно также определить области, где совместный выбор законов регулирования АРВ и УПК также не приводил бы к нарушению колебательной статической устойчивости исследуемой электрической системы.

### Литература

1. **Веников В.А.**, Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1964.
2. **Голов В.П.**, Мартиросян А.А. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 5.

## Пути повышения эффективности расхода электроэнергии на текстильных предприятиях

Удельный расход электроэнергии (ЭЭ) на промышленных предприятиях России в 2–2,5 раза больше чем за рубежом. При этом около 60 % ЭЭ приходится на технологическое оборудование, более 25 % потребляет системы освещения и вентиляции, 15 % приходится на вспомогательные нужды.

Достаточно большой расход ЭЭ на вентиляцию и освещение характерен даже для работы предприятий с номинальной производительностью и использованием всего парка машин и агрегатов. Большинство предприятий в современных условиях работают очень нестабильно. Так объем выпускаемой текстильными предприятиями продукции и ее ассортимент зависят от спроса на рынках сбыта, поставок сырья и полуфабрикатов, парка оборудования и его состояния, квалификации основного и вспомогательного персонала. Для предприятий с низкой степенью загрузки технологического оборудования и работе систем освещения и вентиляции практически с постоянной нагрузкой доля расхода ЭЭ на освещение и вентиляцию значительно увеличивается.

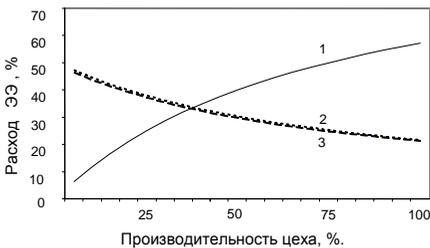


Рис. 1. Зависимости изменения расхода ЭЭ на технологию, освещение и вентиляцию от загрузки прядильного цеха: 1 – расход ЭЭ на технологические нужды; 2 – расход ЭЭ на освещение; 3 – расход ЭЭ на вентиляцию

моделирования. Основные результаты отражены на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей электропотребления показал, что расход электроэнергии по структурным подразделениям и предприятию в целом можно снизить на 40 % за счёт регулирования режимов электропотребления систем освещения и вентиляции.

Для оценки возможности экономии электроэнергии в системах освещения и вентиляции для нестабильно работающих производств проведено исследование изменения величины электропотребления прядильного цеха текстильного предприятия в зависимости от числа и производительности технологического оборудования, количества и расположения светильников, режима работы вентиляционных установок для различного объема выпускаемой пряжи и ее ассортимента. Исследования проведены с использованием методов многофакторного математического

УДК 621.316.925

В.К. СЛЫШАЛОВ, д.т.н., профессор, В.Н. ГРЕЧУХИН, к.т.н., доцент,  
Ю.А. КИСЕЛЕВА, к.т.н., В.Д. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Расчет электромагнитного поля и параметров коаксиального измерительного шунта**

При использовании коаксиальных шунтов для измерения как синусоидальных, так и импульсных токов наиболее существенной является проблема идентификации результатов измерения и измеряемого тока. Поскольку ни одна из существующих конструкций шунта и схем измерения [1] не позволяет отстроиться от составляющей напряжения пропорциональной производной измеряемого тока, встает задача ее расчетной оценки, базирующейся на анализе электромагнитного поля шунта и полученных при этом интегральных параметрах.

В предлагаемом докладе задача об электромагнитном поле шунта решена на основе уравнений Максвелла, преобразованных к волновому уравнению для коаксиальной короткозамкнутой линии.

Для синусоидального тока получены распределения напряженностей электрического и магнитного полей в электродах и воздушном зазоре шунта, рассчитаны частотные характеристики для постоянной распространения, волнового и входного комплексных сопротивлений, оценены возможности конструктивного пути регулирования погрешности измерения тока.

Выполнено обобщение перечисленных результатов на случаи переходного и импульсного режимов. Оценены перспективы применения коаксиальных шунтов рассмотренной конструкции для измерения импульсных токов в молниеотводах и протяженных заземлителях.

### **Литература**

1. **Болотин И.Б.**, Эйдель Л.З. Измерения в переходных режимах короткого замыкания. – 2-ое издание перераб. и доп. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1981. – 192 с.

УДК 621.311

А.А. БРАТОЛЮБОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Значение и смысл приведенного времени в показателях сравнительной экономической эффективности**

Допущения об ограничении срока строительства одним годом и об эксплуатации объекта с неизменными издержками позволяют определять суммарные дисконтированные затраты  $DЗ$  по формуле

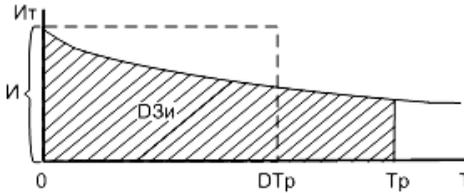
$$DЗ = K + II \cdot DT_p, \quad (1)$$

где  $K$  – единовременные капитальные вложения;  $I$  – ежегодные издержки;  $DT_p$  – приведенное расчетное время службы объекта, обеспечивающее дисконтирование издержек  $I$ . Можно показать, что

$$DT_p = (a - a^{T_p+1}) / (1 - a), \quad (2)$$

где  $T_p$  – расчетный срок службы объекта;  $a = 1/(1+E)$ ;  $E$  – норма дисконта.

Физический смысл приведенного времени  $DT_p$  (2) сходен с такими понятиями в электрических сетях, как время  $T_u$  использования максимума нагрузки или время  $\tau$  максимальных потерь, когда в расчетах интегральная величина (в данном случае издержковая составляющая  $DZ_u$  суммарных затрат) некоторой переменной (дисконтированных издержек  $I_t$  за время  $T_p$ ) эквивалентуруется (см. рисунок) площадью прямоугольника (со



сторонами  $I$  и  $DT_p$ ). В рассмотренной постановке введение приведенного времени в показателе (1) позволяет упростить его расчет, установив связь с другим показателем – приведенными затратами (оказывается, что нормативный срок окупаемости  $T_u$

равен приведенному времени  $DT_p$ ) и расширить, таким образом, представление об обоих показателях.

Установленная связь между ними позволяет констатировать, что экономический оптимум при развитии электрических сетей в настоящее время сместился в пользу менее емких по капитальным затратам вариантов.

УДК 621.311

С.В. БАЛДОВ, аспирант, А.А. ШУЛЬПИН, к.т.н., доцент (ИГЭУ)

## Программное обеспечение работ по анализу электропотребления предприятий

Оценка эффективности мероприятий по электросбережению невозможна без анализа фактического и нормализованного электропотребления на всех уровнях иерархической структуры предприятия. Однако на низших ступенях иерархии предприятия фактическое электропотребление определить невозможно, так как учёт электроэнергии (ЭЭ) либо вообще отсутствует, либо производится только для отдельных электропри-

ёмников, а расчет норм электропотребления затруднен из-за наличия большого количества разнородного электрооборудования, работающего по различным производственным программам.

С использованием разработанного программного комплекса (ПК) одновременно с совершенствованием системы учета ЭЭ, значительно улучшается информационное обеспечение для анализа электропотребления, а также повышается эффективность управления. ПК включает следующие основные блоки:

- база данных;
- расчетный блок;
- расчет нормализованных энергетических балансов по узлам учета ЭЭ и структурным подразделениям предприятия;
- составление фактических энергетических балансов по узлам учета ЭЭ и структурным подразделениям предприятия с нормализованными. Основными функциональными возможностями ПК являются:
- составление функциональной модели предприятия;
- анализ электробалансов на всех ступенях иерархии предприятия;
- расчет показателей эффективности энергоиспользования;
- изменение хода расчета показателей при недостаточности данных;
- сопоставление фактического электропотребления с расчетным или плановым электропотреблением;
- возможность интеграции ПК с АСКУЭ и АСУ ТП.

Проводя оперативный анализ фактических данных по электропотреблению, полученных с помощью автоматизированной системы учета ЭЭ и сопоставляя их с данными ПК, становится возможным:

- проводить планирование и управление электропотреблением для снижения платы за электроэнергию;
- выявлять места с повышенным энергопотреблением и принимать необходимые меры по его снижению;
- определять энергетическую составляющую себестоимости продукции на отдельных этапах производства и принимать необходимые меры по ее снижению.

УДК 621.321.925

Н.Б. ИЛЬЧЕВ, к.т.н., доцент, А.И. КУЛЕШОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

В.А. СЕРОВ, к.т.н., доцент  
(Ивановское РДУ)

## **Применение метода Гаусса в программе расчета токов при несимметричных КЗ**

В методе симметричных составляющих для расчетов токов при несимметричных коротких замыканиях необходимо определить сопротивление шунта КЗ и построить эквивалентную схему замещения (СЗ)

прямой последовательности [1]. Сопротивление шунта КЗ определяется эквивалентными сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей и способом их соединения.

Эти сопротивления могут быть получены в результате исключения неизвестных по методу Гаусса. Известно, что шаг прямого хода метода Гаусса при решении уравнений узловых напряжений соответствует исключению узла из схемы и получению матрицы узловых проводимостей (МУП) для эквивалентной сети без этого узла [2]. Таким образом, если выполнить N-1 шаг по методу Гаусса, где N – число узлов в СЗ, то СЗ эквивалентно сопротивлением СЗ. Оставшийся узел должен быть узлом КЗ.

В программе «Энергия ТКЗ» используется модификация метода Гаусса, заключающаяся в разложении МУП соответствующих последовательностей в произведение треугольных

$$Y=L \cdot W.$$

Решение с треугольными матрицами выполняется по следующей схеме:

$$YU=I; L \cdot W U=I; LB=I \text{ и } WU=B,$$

однако, для каждой последовательности имеется только один задающий ток в узле КЗ, причем это значение соответствует последнему элементу этого вектора. Диагональные элементы нижней треугольной матрицы **L** равны единице, это значит, что вектор **B** равен вектору **I** и состоит только из одного ненулевого значения, которое равно току КЗ. Следовательно, для определения напряжений в узлах СЗ решаются только уравнения вида с верхней треугольной матрицей **WU=I**.

При расчете токов в ветвях СЗ нулевой последовательности для линий со взаимными индукциями необходимо определить разность напряжений по концам этих линий  $\Delta U$  и решить систему уравнений

$$Z \cdot I = \Delta U,$$

где **Z** – матрица собственных сопротивлений линий и сопротивлений взаимных индукций нулевой последовательности; **I** – вектор токов линий.

Решением аналогичных уравнений определяются токи в тросах

$$\begin{bmatrix} Z_{лл} & Z_{лт} \\ Z_{тл} & Z_{тт} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{л} \\ I_{т} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{л} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

#### Литература

1. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматике в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
2. **Кулешов А.И.** Алгоритмические проблемы анализа режимов электрических систем при определении интегральных характеристик: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Свердловск, 1982.

УДК 621.321.925

Н.Б. ИЛЬИЧЕВ, к.т.н., доцент, А.И. КУЛЕШОВ, к.т.н., доцент, (ИГЭУ)  
В.А. СЕРОВ, к.т.н., доцент (Ивановское РДУ)

## **Построение схемы замещения нулевой последовательности в программе расчета несимметричных ТКЗ**

При использовании метода симметричных составляющих для расчетов несимметричных токов короткого замыкания (ТКЗ) на «землю», наибольшую трудность представляет построение и определение параметров схемы замещения нулевой последовательности (СЗНП). Для уменьшения трудоемкости и снижения вероятности появления ошибок при определении ее параметров в программе «Энергия ТКЗ» автоматизация получения параметров СЗНП, которая формируется в памяти ЭВМ непосредственно по первичной информации об электрической сети.

По сравнению со схемой прямой последовательности, для построения СЗНП требуется задания дополнительных данных, определяющих режим работы нейтрали трансформаторов и данных, необходимых для определения собственных сопротивлений нулевой последовательности линий и сопротивлений взаимных индукций между линиями находящимися вблизи друг с другом.

Собственные сопротивления СЗНП линий определяются по геометрии подвески проводов и тросов [1]. Для чего в электронный справочник ПК «Энергия» введен объект «опоры». При числе взаимовлияющих линий две и более вводится понятие направленного коридора. В коридорах задается расстояния между осями опор и направление линий относительно линии относительно коридора наличие и способ заземления тросов. Задание коридоров для одиночных линий необязательно.

Ширина коридора определяется расстояниями между линиями и принимается не более 1000 м. При большем расстоянии между линиями они перестают взаимноиндуктировать друг с другом.

Для двухцепных линий подвешенных на одной опоре указывается номер каждой из цепей линии.

Граф СЗНП строится в памяти ЭВМ автоматически в виде дерева и хорд. Начальным узлом дерева выбирается узел КЗ. Конечными ветвями дерева могут быть ветви: соединяющие узел с «землей» (например, ветвь трансформатора с заземленной нейтралью и обмоткой соединенной в треугольник; ветвь–нагрузки; ветвь–система); ветвь, один из узлов которой не связан с другими узлами и с «землей» (например, ветвь трансформатора с незаземленной нейтралью или обмотка среднего напряжения у трехобмоточного трансформатора соединенная в незаземленную звезду) в этом случае вся цепочка от точки разветвления до такой ветви не включается в СЗНП. Хорды, замыкают контуры СЗНП.

После определения графа СЗНП определяются сопротивления и проводимости ее ветвей и формируется матрица узловых проводимостей для СЗНП.

### **Литература**

1. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматике в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

УДК 621.311

Э.Ю. АБДУЛЛАЗЯНОВ, к.т.н., доцент, И.Ф. ГАЛИЕВ, к.т.н., доцент,  
(КГЭУ, г. Казань)  
Б.А. ЗАБЕЛКИН,  
(ОАО «Сетевая компания», г. Казань)

## Разработка модели надёжности узлов нагрузки

Надёжность электроснабжения потребителя в рамках договорных отношений нуждается в нормировании, что подразумевает для сетевых компаний оптимизацию капиталовложений и ежегодных издержек на эксплуатацию основных объектов питающих линий и подстанций.

В связи с этим актуальна разработка адекватных математических моделей сети, питающих крупные узлы нагрузок, предназначенных для текущей и, в особенности, прогнозной оценки показателей надёжности электроснабжения крупных потребителей по ключевым отраслям экономики регионов.

Предлагается разработка модели на основе метода Монте-Карло (статистических испытаний). При этом предъявляются повышенные требования к достоверности исходной информации, полученной посредством обработки материалов представительных выборок однотипного оборудования

Производится предварительный отбор однородных групп оборудования (с одинаковыми условиями эксплуатации) и формируются представительные выборки сетевого оборудования, непосредственно влияющего на надёжность функционирования узлов нагрузок (линии, выключатели, трансформаторы и др.).

Методами математической статистики производится обработка исходной информации о сезонных нагрузках, резерве мощности узлов и надёжности работы оборудования выбором с построением группированных статистических рядов, определением их числовых и интегральных характеристик

Формируется расчётная схема метода, позволяющая одновременно моделировать полную группу событий, происходящих в конкретном узле нагрузки, в соответствии с их интегральными характеристиками.

Производится собственно моделирование с числом реализаций, соответствующим точности исходных данных.

Производится обработка массивов выходной информации с расчётом комплексных показателей надёжности, включая вероятностный недоотпуск электроэнергии и ущерб у конкретного потребителя.

Сформированная модель позволяет произвести доверительную оценку надёжности электроснабжения каждого конкретного потребителя при различных вариантах развития питающей сети.

Ю.А. ВАСИЛЬЕВ  
(ОАО «Сетевая компания», г. Казань)  
Л.В. АХМЕТВАЛЕЕВА, к.п.н., доцент  
(КГЭУ, г. Казань)  
С.В. БЕЗРУКИХ  
(ОАО «Уралтранснефтепродукт», г. Уфа)

## **Потери мощности от высших гармоник тока**

Использование методики задающих токов высших гармоник целесообразно при экспериментальном исследовании состава высших гармоник в системе электроснабжения в процессе ее эксплуатации. На этапе проектирования и при анализе полученных экспериментальных результатов необходимо иметь математическую модель преобразователя с учетом параметров его нагрузки. Как показывает анализ научной и технической литературы, если такие модели существуют, то отсутствует их математическое обоснование и область применения, что приводит к недостоверным результатам в расчетах. Причем для некоторых преобразователей они в принципе неверные.

На основе относительно нового математического аппарата – локального преобразования Фурье – были получены математические модели однофазных и трехфазных управляемых вентильных преобразователей, позволяющие получить их схемы замещения для расчета гармоник тока и напряжения в питающей электрической сети.

Схема замещения однофазного преобразователя сводится к сочетанию источника напряжения и источника тока. Причем последний обусловлен исключительно токами коммутации.

Более сложной получается схема замещения трехфазного преобразователя. Она включает в себя один источник напряжения, определяемый выпрямленным током в момент начала коммутации; второй источник напряжения, определяемый напряжением искажения, и три источника тока.

Исследования, выполненные на разработанных моделях, позволили выявить механизм влияния преобразователей на гармонический состав токов в цепях их питания через общие шины их подключения. Как показали модельные эксперименты, высшие гармоники напряжения питания оказывают тем меньшее влияние на изменение гармоник тока, чем больше индуктивность нагрузки со стороны выпрямленного тока. Это согласуется с методикой задающих гармонических токов, однако не объясняет причину изменения гармонического состава тока, которая заключается в изменении состава гармоник коммутационных токов.

Таким образом, для достоверного расчета потерь мощности от высших гармоник токов необходимо правильно рассчитывать форму коммутационных токов, учитывая полный спектр напряжения питания.

Э.Ю. АБДУЛЛАЗЯНОВ, к.т.н., доцент  
(ОАО «Сетевая компания», г. Казань)  
А.И. ФЕДОТОВ, д.т.н., профессор  
(КГЭУ, г. Казань)  
А.В. ЛЕОНОВ  
(ОАО «Уралтранснефтепродукт», г. Уфа)

## **Повышение надежности электроснабжения перекачивающих станций нефтепродуктов**

Высокая стоимость транспортируемого продукта и необходимость своевременного выполнения коммерческих обязательств перед получателями обуславливает высокие требования организаций, занимающихся транспортом по трубопроводам нефти и нефтепродуктов, к бесперебойности функционирования перекачивающих станций. Дополнительным фактором, сказывающимся на оценке эксплуатационных характеристик перекачивающих станций, является их длительная эксплуатация.

Таким образом, налицо актуальность решения общей задачи по обеспечению бесперебойного электроснабжения станций перекачки нефтепродуктов. Главным элементом системы внутреннего электроснабжения станций являются синхронные и асинхронные высоковольтные двигатели, приводящие во вращение насосы перекачки нефтепродуктов. Синхронные двигатели имеют преимущественно бесщеточную систему возбуждения. Эти двигатели участвуют в самозапуске. Правильно рассчитать условия обеспечения самозапуска возможно только при наличии ее адекватной математической модели. Достоверный расчет токов короткого замыкания определяет правильность настройки уставок релейной защиты и в существенной мере зависит от корректности учета подпитки места замыкания синхронными двигателями.

Современная тенденция использования цифровых терминалов для устройств релейной защиты на станциях перекачки нефтепродуктов предполагает организацию АСУ ее электрической части. Актуальным становится разработка таких математических моделей систем электроснабжения, и в первую очередь для синхронных двигателей с бесщеточным возбуждением, применяемых на станциях, которые бы сочетали в себе корректный учет специфики вентильной части электромашино-вентильной системы и обеспечивали быстродействующие алгоритмы расчета для реализации управления системой электроснабжения в реальном времени в установившихся и переходных процессах.

Исследования показывают, что на базе уже апробированных дискретных математических моделей синхронных машин можно перейти к непрерывным математическим моделям систем электроснабжения в целом, что существенно упрощает интеграцию локальных конечно-разностных моделей синхронных машин в общую модель.

## Решение уравнений движения проводов при коротком замыкании по неявной схеме

Динамика провода при коротком замыкании (КЗ) описывается дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами. Такие уравнения решаются с использованием численных методов. Производные в уравнениях заменяются конечно-разностными отношениями с использованием явной и неявной схемы. Алгоритмы, составленные по явной схеме, дают меньший объем вычислений и позволяют рассчитывать даже разрывные решения. Однако при больших токах КЗ устойчивость численного решения по явной схеме может нарушиться. Решить эту проблему можно переходом на неявную схему. Неявная схема требует записи дифференциальных уравнений движения провода в следующем виде [1]

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} - \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s_0^2} = \bar{P}^* . \quad (1)$$

Выражение (1) записывается в виде конечно разностных отношений

$$\frac{\hat{R}_i - 2R_i + \check{R}_i}{\tau^2} - \lambda^2 \frac{\hat{R}_{i+1} - 2\hat{R}_i + \hat{R}_{i-1}}{h^2} = \bar{P}^* , \quad (2)$$

где  $\hat{R}_i$ ,  $R_i$ ,  $\check{R}_i$  – значения координат на  $t + 1$ ,  $t$  и  $t - 1$  шагах интегрирования.

Система конечно-разностных уравнений (2) решается методом алгебраической прогонки.

На основе математической модели численного решения дифференциальных уравнений по неявной схеме, была составлена компьютерная программа. По составленной компьютерной программе были проведены расчеты, результаты которых хорошо согласуются с опытными данными и результатами расчетов, полученных по явной схеме.

### Литература

1. **Сергей И.И.**, Стрелюк М.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

УДК 621.321

И.И. СЕРГЕЙ, д.т.н., профессор, А.П. АНДРУКЕВИЧ, аспирант  
(БНТУ, Беларусь)

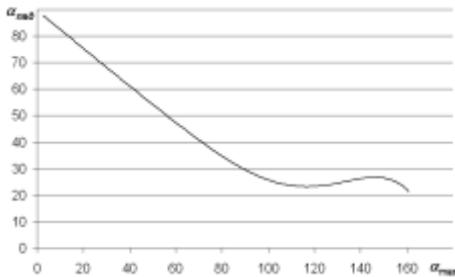
## Определение третьего максимума тяжения с учетом угла падения провода после отключения короткого замыкания

Неуклонный рост токов коротких замыканий (КЗ), увеличение электродинамических сил при КЗ на конструкции делают проблему расчета электродинамической стойкости гибких проводников с каждым годом все более актуальной. К параметрам электродинамической стойкости относятся максимальные отклонения и тяжения проводов.

В статье излагается упрощенный метод расчета третьего максимума тяжения, основанный на представлении провода физическим маятником и составленных для него формулах энергетического баланса после КЗ [1]. Третий максимум тяжения  $T_{3\max}$  возникает, когда запасенная в процессе подъема провода при движении его по траектории потенциальная энергия преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор при проходе наинижней точки траектории движения.

$$T_{3\max} = \cos(\alpha_{\text{пад}}) \cdot \sqrt{T_0^2 + 13.08 \cdot E \cdot A s \cdot f_0 \cdot \rho \cdot (1 - \cos(\alpha_{\text{max}}))}.$$

Ранее предполагалось, что после отклонения провода на какой-то угол  $\alpha_{\text{max}}$  происходит его вертикальное падение. Это давало завышенные



результаты. В представленной же формуле благодаря введению угла падения провода  $\alpha_{\text{пад}}$  делается попытка учета того, что падение провода происходит под некоторым углом к его первоначальному положению. С помощью вычислительного эксперимента на компьютерной программе BusEf удалось получить

универсальный график для определения угла падения провода. Представленный график может применяться при расчете проводов различного сечения, пролетов различной длины и различной продолжительности КЗ.

### Литература

1. **Сергей И.И.**, Андрукевич А.П., Пономаренко Е.Г. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.

## Вычислительный эксперимент пляски проводов расщепленных фаз при наличии гасителей колебаний

Значительный ущерб от пляски проводов воздушных ЛЭП инициировал работы по ограничению амплитуд пляски различными методами. В настоящее время наиболее перспективны – комбинированные гасители колебаний TDD (Torsional Damper and Detuner), разработанные в Льежском техническом университете (ЛТУ).

В докладе излагаются результаты полевых наблюдений в КазНИИЭ [1] и вычислительного эксперимента в БНТУ пляски расщепленной фазы (РФ) 2хАС-400/51 в пролете 292 м и оценка эффективности TDD.

В БНТУ разработаны два численных метода расчета РФ. Один из них базируется на полной расчетной модели фазы в виде пучка гибких нитей, зафиксированных на заданном расстоянии в нескольких точках пролета жесткими стержнями – распорками. Второй метод – моделирование РФ эквивалентным проводом.

При численном моделировании указанной задачи использовались опытные аэродинамические характеристики провода. С использованием величины эквивалентной крутильной жесткости фазы  $6163 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$ , найденной по опытной частоте крутильных колебаний, выполнено сравнение расчетных и опытных результатов, полученных КазНИИЭ, при начальном угле оледенения, равном  $10^\circ$  (табл. 1). Гасители колебаний весом 30 кг устанавливались в 1/3 и 2/3 частях пролета [1].

Таблица 1. Сопоставление расчетных и опытных параметров однополуволновой пляски фазы пролета КазНИИЭ

v, м/с	Наличие гасителя	Расчет		Опыт		Расхождение	
		$A_{m-m}$ , м	$\theta_{m-m}$ , град	$A_{m-m}$ , м	$\theta_{m-m}$ , град	$\Delta A_{m-m}$ , %	$\Delta \theta_{m-m}$ , %
10	нет	1,2	28	1,2	30	0	6,7
11	нет	1,5	36	1,9	30	21,0	20,0
10	есть	$\approx 0,08$	8	0,09	10	11,1	20,0

Строгая математическая постановка задачи расчета пляски проводов с учетом комбинированных гасителей позволяет приблизить вычислительный эксперимент к условиям реальной пляски. Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил эффективность гасителей пляски TDD в ограничении амплитуд однополуволновой пляски.

### Литература

1. Final Report on Tests of TDD Antigalloping Device. – Scientific-industrial Company Electrosetjstroyproject (ESSP). – Almaty; Moscow, 1998.

## **Влияние накопителя энергии системы импульсного электропитания передающего устройства антенны на работу РЛС на автономном объекте**

В качестве источника электроэнергии на автономных объектах обычно применяются дизель-генераторные установки с синхронными генераторами (СГ). На некоторых АО одной из нагрузок является система импульсного электропитания (СИП), мощность которой соизмерима с мощностью СГ. К таким объектам относятся радиолокационные станции (РЛС) ПВО по обнаружению малозаметных высокоскоростных средств воздушного нападения. Основная функция СИП – формирование мощных периодических импульсов тока, заданных длительности и формы, которые, в конечном счете, определяют параметры радиосигнала антенны и качество работы РЛС.

На основе структурного моделирования разработана математическая модель системы электропитания АО с СИП, включающая СГ, СИП и прочую нагрузку (электропривод вращения антенны, системы электроотопления и др.), где СИП представлен блоками «зарядное устройство – емкостной накопитель энергии – генератор импульсов».

Надежность обнаружения цели во многом зависит от стабильности сигнала передающего устройства (ПУ), которое, в свою очередь, определяется пульсациями высоковольтного источника питания, колебаниями напряжения СГ и быстродействием системы управления, то есть точностью поддержания предразрядного напряжения накопительного конденсатора СИП ( $U_{\text{нак}}$ ). Исследования на модели показали, что нестабильность  $u_{\text{нак}}(t)$  приводит к амплитудной нестабильности импульсов тока, формируемых при разряде накопителя. В результате имеет место амплитудно-фазовая нестабильность выходных СВЧ радиоимпульсов (РИ) канала ПУ. Амплитудная нестабильность РИ влияет на дальность обнаружения цели, а фазовая нестабильность РИ определяет селекцию движущихся целей. При значительной фазовой нестабильности отраженный сигнал от неподвижного объекта будет ложно воспринят как эхо-сигнал от движущегося объекта. Это резко снижает надежность РЛС.

На математической модели проанализировано влияние на эти важнейшие показатели работы СИП автономного объекта таких факторов, как соизмеримость мощности СГ и СИП, качество ( $\cos\varphi$ ) прочей нагрузки, подключенной к СГ, параметры фильтра и емкости накопителя энергии. Проведен анализ влияния различных факторов на стабильность  $u_{\text{нак}}(t)$  и даны рекомендации по снижению  $\Delta u_{\text{нак}}(t)$ .

## **Матричный синтез математических моделей систем импульсного электропитания**

Разработка специализированных программных продуктов (СПП), ориентированных на автоматизированное проектирование (АП) систем импульсного питания (СИП), имеет тенденцию создания электрических схем замещения, математических моделей (ММ) и алгоритмов типовых укрупненных электрических и электронных блоков. Анализ большого массива схмотехнических структур таких СИП, как источники питания электрофизических установок, устройства магнитно-импульсной и лазерной обработки материалов, приборы мощной высокочастотной электроники показывает, что их можно рассматривать как каскадное соединение ряда типовых узлов. К ним относятся первичный источник электропитания, обширный класс полупроводниковых выпрямителей и инверторов, различные модификации трансформаторов и накопителей энергии, мощные разрядные устройства, формирователи импульсов заданной формы. Исследование динамических и стационарных процессов в СИП с помощью СПП оправдывается сокращением времени вычислительного процесса, особенно при проведении НИОКР мелких серий нестандартных схем специального назначения.

Предложены схемы замещения и ММ подмножества электрических и электронных каскадов СИП, для которых введены ограничения: схемы содержат источники напряжения, пассивные элементы, линейные на каждом шаге численного интегрирования, и не содержат источников тока, в ММ используется кусочно-линейная аппроксимация вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов.

Математическое оформление уравнений блоков базируется на формировании полных матриц инцидентности каскадов, позволяющих выполнить последующий синтез на их основе ММ многовариантных функциональных структур СИП. Матрицы инцидентности отдельных каскадов разработаны таким образом, чтобы обеспечить бесконфликтную горизонтальную и вертикальную конкатенации при машинном формировании синтезируемой матричной ММ СИП. Созданные модели СИП ориентированы на известные высокоэффективные алгоритмы преобразования системы алгебраических и дифференциальных уравнений к уравнениям в форме переменных состояний. В качестве иллюстрации приводится матричный синтез ММ зарядного устройства емкостного накопителя энергии и озонатора с импульсным источником питания.

## Атмосферные перенапряжения на тросах воздушных линий электропередачи

При выборе оптимальной конструкции воздушной линии электропередачи приходится учитывать множество воздействующих факторов: в том числе и перенапряжения, возникающие при прямом ударе молнии. Тросы, устанавливаемые для повышения грозоупорности, в целом позволяют существенно уменьшить число грозовых отключений воздушных линий. Однако подвеска тросов приводит к увеличению числа прямых ударов молнии в ЛЭП, причем, чем выше установлен трос, тем чаще разряды молнии будут ориентироваться на линию. При приближении тросов к фазным проводам возрастает вероятность обратного перекрытия в изоляционном воздушном промежутке трос-провод. Для выбора оптимального расположения троса необходимо проводить сравнительную оценку расчетной формы перенапряжений, возникающих при ударе молнии в трос, и вольт-секундной характеристики изоляционного воздушного промежутка трос-провод.

Авторами предложен метод расчета тока и формы импульса перенапряжения на отдельных элементах конструкции при ударе молнии в трос воздушной линии [1]. Выполнены расчеты перенапряжений для одноцепной воздушной линии 110 кВ на одностоечных железобетонных опорах при ударе молнии с максимальным током 20 кА в трос. Высота опор  $h_{оп}=22,6$  м (индуктивность опоры  $L_{оп}=2,26 \cdot 10^{-5}$  Гн), стационарное сопротивление заземления  $R_з=10$  Ом/м, длина пролета  $l_{пр}=300$  м. При попадании молнии в середину пролета перенапряжение на тросе в точке удара при таком токе достигает почти 2МВ, а на опоре не превышает 0,25 МВ. Однако длительности такого повышения напряжения не более 1-2 мкс.

В случае удара молнии в трос вблизи опоры максимальное значение тока в точке удара немного уменьшается по сравнению со случаем поражения середины пролета, а величина перенапряжения снижается значительно. Практически весь ток молнии стекает через ближайшую к месту удара опору, поэтому напряжение на опоре почти 0,5 МВ.

При одновременном уменьшении индуктивности опор в два раза и при увеличении сопротивления заземления в два раза ток молнии, перенапряжение в точке удара, токи в опорах практически не изменяются. При увеличении сопротивления заземления даже при ударе молнии в середину пролета напряжение на опорах возрастает на 20 процентов, а снижение индуктивности в два раза позволяет на 30 процентов его уменьшить. Увеличение длины пролета линии электропередачи приводит к возрастанию вероятности перекрытия воздушного промежутка трос-провод, но вероятность обратного перекрытия изоляции на опоре снижается.

### Литература

1. **Сорокин А.Ф.**, Могиленко А.П., Барабошкина Т.В. Методика расчета грозовых отключений воздушных линий высокого напряжения с тросовой защитой / Российский национальный симпозиум по энергетике: Мат-лы докл. РНСЭ. Том II, КГЭУ. – Казань, 2001. – С. 65-69.

УДК 621.311(567)

ХАСАН АЛЬВАН ХУССАЙН, аспирант, А.Ю. МУРЗИН, к.т.н., доцент,  
О.А. БУШУЕВА, к.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## Компенсация реактивной мощности в сетях промышленных предприятий Республики Ирак

Для промышленных сетей задачи компенсации реактивной мощности и поддержание параметров качества напряжения в соответствии с ГОСТ 13109-97 являются актуальными.

Для решения этих задач одновременно на промышленных предприятиях нашли применение различные типы компенсирующих устройств (КУ): конденсаторные установки, фильтрокомпенсирующие устройства и статические тиристорные компенсаторы (СТК), выполненные по различным схемам.

Проведенный сравнительный анализ характеристик различных источников реактивной мощности (ИРМ), применяемых в сетях энергосистем и промышленных предприятий, показал, что известные схемы СТК не приемлемы для цеховых сетей по многим причинам (дороговизна, большие габариты, недостаточная компенсирующая способность, генерация в сеть высших гармоник и т.п.) [1].

Наиболее перспективной схемой для регулирования напряжения в цеховых сетях за счет изменения перетоков реактивной мощности является схема комбинированного регулируемого источника реактивной мощности (КИРМ), устанавливаемого на цеховой подстанции.

Новая схема КИРМ, приведенная на рис. 1 позволяет свести к минимуму недостатки применяемых в настоящее время на промышленных предприятиях схем ИРМ.

Конденсаторная установка имеет три ступени регулирования. ( $C_1=C_2=C_3$ ). Каждая ступень подключается к сети через реакторы ( $L_0$ ) и управляемые тиристорные вентили VS1, расположенные только в двух фазах, что позволяет снизить потери мощности в самом устройстве коммутации на одну треть.

Установка содержит реакторы L, которые вместе с тиристорными регуляторами VS2 соединены в треугольник. Как показали исследования [2], при такой схеме соединения реакторов снижается генерация высших гармоник в сеть за счет уменьшения третьей гармоники тока в 4-5 раз. Реактивная мощность реакторов равна мощности одной ступени КУ ( $Q_L=Q_{C1}$ ).

Автоматическое регулирование мощности КУ происходит за счет включения или отключения отдельных ступеней, одновременно плавно изменяется мощность  $Q_L$  (100, 75, 50, 25,0 %) от мощности одной ступени КУ за счет изменения угла открытия тиристорных вентилей VS2.

Предложенная схема, включаемого на шины низшего напряжения цеховой подстанции, позволяет плавно регулировать реактивную мощность ИРМ в диапазоне – 25 до +75 квар, а также обладает быстродействием более 40 квар/с.

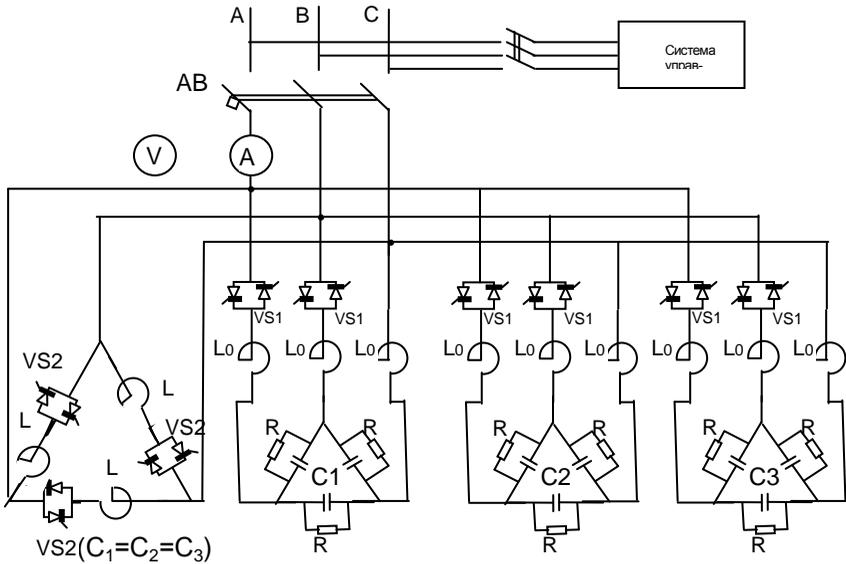


Рис. 1. Схема комбинированного регулируемого источника реактивной мощности

#### Литература

1. **Прня Р.**, Чехов В.И. Качество напряжения – новое в решении проблемы компенсации реактивной мощности. – М.: Электроника, 1999.
2. **Прня Р.**, Хевсуриан И.М., Шевченко В.В. Эффективное устройство регулирования уровня напряжения в цеховых сетях промышленных предприятий: Тез. док. Всерос. науч.-техн. конф. «Электропотребление, электроснабжение, электрооборудование. – Оренбург, 1999.

## **Анализ рынка низковольтного коммутационного оборудования**

Важнейшим вопросом реконструкции и проектирования систем электроснабжения является выбор щитового и коммутационного оборудования. Подавляющее большинство промышленных предприятий и проектных организаций выбирают изделия, разработанные западными фирмами, которые изготавливаются в России с использованием импортных комплектующих. Это положение обусловлено сложившимся уровнем цен: с одной стороны качественное, но очень дорогое оборудование зарубежных фирм, с другой дешевые, но низкого качества отечественные щиты и аппараты. Причина такого положения на рынке низковольтной коммутационной аппаратуры сложилась из-за отсутствия современных отечественных разработок, так аппараты серии А3700 и выключатели «Электрон» это разработки 70-х годов, автоматические выключатели ВА55 Ангарского электромеханического завода появились на рынке в 80 годах. Ведущие западные компании ABB, Schneider Electric, Siemens, Moeller постоянно обновляют номенклатуру изделий, представляя на рынок новые образцы низковольтной аппаратуры. Schneider Electric в 2002 году организовала грандиозную кампанию по представлению автоматического выключателя Masterpact, серия NT на токи 630-1600 А и Masterpact NW на токи до 6300 А. АББ Индустри и Стройтехника в 2004 году провела презентации новой серии автоматических выключателей SACE Tmax на токи от 1 до 630 А.

Для сравнения Российских и зарубежных аппаратов рассмотрим их технические характеристики, приведенные в таблице 1. Данные таблицы показывают, что ряд характеристик, таких как отключающая способность 40 кА (А3710Б) и 100 кА (Isomax S4) для отечественных и импортных аппаратов просто не сопоставимы и этому есть объяснение. Серия выключателей SACE Tmax оснащена быстродействующим расцепителем, обладающим токоограничивающим действием. При токах КЗ превышающих десятикратное значение номинального тока контакты самопроизвольно расходятся, и сопротивление дуги вводится в цепь короткого замыкания, ограничивая величину тока. Каталожное значение отключающей способности выключателя в 100 кА никогда не будет достигнуто, поскольку при  $I=10 \cdot I_n$  выключатель самопроизвольно отключится.

Приведенное в таблице значение времени отключения 6 мс, меньше половины периода тока промышленной частоты. Малое время отключения снижает тепловое воздействие токов короткого замыкания. При учете результатов ограничения тока, на этапе проектирования си-

стем электроснабжения можно было бы получить существенную экономию при выборе шин, кабелей и другого токоведущего оборудования.

Таблица 1. Автоматические выключатели российских и зарубежных изготовителей

№ п/п	Тип	Изготовитель	$I_{ном.}$	$I_{сш.}$	Износостойкость Циклов ВО		Время отключения	Масса
			А	кА	Механ.	Электр.		
1	АП-50Б	Электроаппарат, Курск	63	6			40	1,3
2	S283	ABB	63	20	20 000	10 000	30	0,38
3	C60N	Schneider	63	20	20 000		30	0,34
4	A3710Б	НПО «ХЭМЗ»	160	40	10 000		30	7,5
5	SACE Isomax S4	ABB	160	100	20 000	10 000	6	4
6	BA51-39Б	Контактор	630	35			30	6
7	SACE T <sub>max</sub> T5	ABB	630	200	20 000	5 000	6	3,25
8	Электрон ЭО40с	Контактор, Ульяновск	6300	115	3000	500	40	234
9	Masterpact NV63	Schneider	6300	150	10 000	1 500	25	120
10	SACE E <sub>max</sub> E6	ABB	6300	150	20 000	3 000	30	140

Автоматические выключатели западного производства оснащаются электромагнитными, термомангнитными или современными электронными расцепителями, которые обеспечивают высокий уровень надёжности, точность срабатывания и нечувствительность к электромагнитным помехам. Электронный расцепитель PR221DS обеспечивает защиту от перегрузки (L) и короткого замыкания с помощью максимальной токовой защиты с выдержкой времени (S) и токовой отсечки (I). Благодаря широкому диапазону регулирования уставок расцепитель предназначен для защиты распределительных сетей, обеспечивая надёжность срабатывания.

Для защиты электродвигателей фирмы рекомендуют использовать специальные расцепители, обеспечивающие дополнительные функции:

- защиту от перегрузки с учетом нагрева меди и магнитопровода;
- защиту электродвигателя от заклинивания, функция R;
- контроль обрыва или перекоса фаз, функция U.

Кроме того, в этих защитах учитываются пусковые токи двигателей и поэтому ток отсечки равен  $14 \cdot I_n$ .

Следует отметить, что для автоматических выключателей, оснащенных электронными расцепителями, кроме временной и токовой селективности может реализовываться логическая селективность.

Рассмотренные выше отличительные особенности импортных выключателей являются причиной того, что всё большее число заказчиков считают оправданным использование в распределительных щитах в качестве вводных и секционных выключателей аппараты таких фирм, как ABB, Schneider Electric или Siemens.

## **Обеспечение селективности защитных средств в сетях низкого напряжения**

Повышение требований к надежности электроснабжения объектов и улучшение технических характеристик защитных аппаратов обострили проблему обеспечения селективности в сетях низкого напряжения. Понятие селективность в ГОСТ Р 50030.2-99 (МЭК 60947-2-98) определяется как «координация рабочих характеристик двух или нескольких устройств для защиты от сверхтоков с таким расчетом, чтобы в случае возникновения сверхтоков в пределах указанного диапазона срабатывало только устройство, предназначенное для оперирования в данном диапазоне, а прочие не срабатывали». Селективность двух устройств защиты от короткого замыкания, соединенных последовательно, может быть частичной или полной вплоть до номинальной наибольшей отключающей способности. Полная селективность обеспечивается если характеристика аппарата А проходит выше характеристики срабатывания В (выключателя расположенного ближе к потребителю). Частичная селективность определяется током координации, соответствующим точке пересечения времятоковых характеристик устройств защиты. При значениях тока короткого замыкания ниже величины тока координации срабатывает только автоматический выключатель В, а при токах короткого замыкания, равных или выше значения тока координации, срабатывают выключатели А и В. В зависимости от условий реализации выделяют следующие виды селективности – селективность по току, селективность по времени и логическую (зонную) селективность. Селективность по току обеспечивается заданием разных уставок для выключателей, установленных со стороны источника питания, задают более высокие уставки, чем автоматам, расположенным на стороне нагрузки. Часто это обеспечивает только частичную селективность. Селективность по времени достигается путем преднамеренного увеличения временной задержки  $\Delta t$  на срабатывание автоматического выключателя, расположенного ближе к источнику питания. Под термином «зона короткого замыкания» понимается часть установки между двумя последовательно включенными автоматическими выключателями, оснащенными электронными расцепителями с функцией дистанционного управления. Этот тип селективности подходит для радиальных сетей. Каждый выключатель, который выявил короткое замыкание, передает сигнал на выключатель, расположенный на стороне питания, по стандартному каналу связи. Тот автоматический выключатель, который обнаружил короткое замыкание и не получил сигналов от выключателей со стороны нагрузки, подает команду на мгновенное отключение. Выклю-

чатели, получившие сигнал от другого расцепителя, будут работать в соответствии с установленной выдержкой времени, если выключатель, который должен был сработать, не отключился. Логическую или зонную селективность реализуют автоматические выключатели зарубежных производителей DPX-H Legrand, SACE Emax и Tmax ABB, Compact NS и Masterpact Schneider Electric.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 50030.2-99 «Аппаратура распределения и управления низковольтная» часть 2, «Автоматические выключатели» для обеспечения координации в условиях короткого замыкания между выключателем и другим устройством защиты от короткого замыкания (УЗКЗ), объединенными в одной цепи, необходимо учитывать характеристики каждого из устройств, так же как и их поведение в этом объединении. Проверку селективности можно осуществить в процессе испытаний, но на этапе проектирования целесообразно делать это чисто теоретически, т.е. путем сравнения рабочих характеристик автомата и взаимодействующего УЗКЗ. Косвенный метод проверки координации по точке пересечения  $I_{co}$ , рекомендованный в п.В.4.5 ГОСТ, заключается в графической проверке соблюдения условий координации защитных аппаратов.

Рассмотрим методику проверки селективности на примере защиты сети 0.4 кВ с помощью предохранителей ПН2-30 на стороне нагрузки и ПН2-40 со стороны питания. Построив защитные характеристики с учетом 50 % разброса параметров и сравнив верхнюю границу, ограничивающую область разброса ПН2-30, с нижней границей для ПН2-40 найдем ток координации, который составляет  $I_{co} = 300$  А. Расширить границы селективной защиты можно поставив в голове предохранитель ПН2-50, в этом случае селективность обеспечивается до тока 400 А. Следует отметить, что использование предохранителей зарубежного производства, на пример, OFAF gG фирмы ABB, обеспечивает селективность во всем диапазоне токов, если отношение номинальных токов предохранителей не ниже 1:1.6. Такое различие объясняется 20 % разбросом защитных характеристик предохранителей иностранных производителей.

Оценку селективности автоматических выключателей проводят по такой же методике, т.е. сравнение рабочих характеристик выключателя и плавкого предохранителя (или другого УЗКЗ), построенные в одинаковых масштабах, уделив особое внимание значениям  $I^2t$  выключателя и плавкого предохранителя во время отключения тока короткого замыкания. Для координации защитных характеристик автоматических выключателей широко используют таблицы селективности, которые публикуются фирмами изготовителями. В таблице указывается выключатель на стороне питания и варианты выбора выключателей на стороне нагрузки. В ячейке на пересечении выбранных вариантов указывается, в случае полной селективности значок Т, а в случае частичной селективности ток координации, до величины которого селективность обеспечивается.

В ряде случаев при построении систем электроснабжения используются токоограничивающие выключатели. Эти аппараты ограничивают значение тока короткого замыкания с помощью введения в цепь КЗ сопротивления электрической дуги и последующего быстрого отключения короткого замыкания, при этом ток КЗ не достигает ожидаемого расчетного значения. При использовании токоограничивающих выключателей следует иметь в виду, что при больших токах они имеют время зависящую характеристику отключения и поэтому при комбинации с обычными аппаратами может обеспечиваться только частичная селективность.

Современные электронные расцепители автоматических выключателей могут осуществлять различные функции релейной защиты и автоматики, так при контроле направления мощности строят направленные защиты от короткого замыкания в замкнутых сетях, реализуются схемы автоматического резервного питания. Ужесточение норм безопасности и введение новых правил устройств электроустановок привело к широкому использованию устройств защитного отключения. Работа всех этих аппаратов должна быть согласована еще на этапе проектирования, поэтому многие фирмы представляют на рынке программные продукты, позволяющие проектировщикам решать задачи координации защит. Такие программы позволяют составить графическую схему электроустановки и, выбрав для нее оборудование, провода и кабели рассчитать токи короткого замыкания. Расчет проводится в автоматическом режиме, а встроенные базы данных позволяют после проверки сделать необходимые замены в оборудовании. На кафедре «Электрические станции» МЭИ создана программа GUSELECT-1, которая строит карту селективности защит радиальной электрической сети с тремя автоматами и проверяет согласованность их защитных характеристик. Компания CSoft представляет программу EnergyCS Электрика, позволяющую выбрать оборудование для системы электроснабжения и обеспечить заданные характеристики: динамическую и термическую стойкость к токам КЗ, чувствительность и согласованность защит разного уровня по селективности. Подобное программное обеспечение предлагает фирма ABB это DocWin и сопутствующие ему программы. В базе данных по оборудованию есть генераторы, трансформаторы, выключатели, разъединители, провода, кабели, средства защиты и автоматики.

#### Литература

1. **Герасимов С.Е.** Селективность защитных средств в сетях низкого напряжения. Строй профиль. №7(53) 2006.

УДК 621.3.017

В.А. ШУИН, д.т.н., профессор, А.В. КОРОТКОВ, студент  
(ИГЭУ)  
В.В. КОРОТКОВ  
(ОГУП «Ивановский центр энергосбережения»)

## О структуре норматива потерь для электросетевых предприятий ЖКХ

В современных методических указаниях по расчетам норматива потерь электроэнергии  $\Delta W_{НОРМ}$  до сих пор не нашли отражение методы расчета многих составляющих норматива. Задача расчета норматива потерь электроэнергии усложняется тем, что структура норматива потерь в электрических сетях различных уровней не одинакова.

Проведен анализ двух составляющих норматива потерь, которые в соответствии с современными положениями могут быть отнесены к «прочим обоснованным и документально подтвержденным условно-постоянным потерям», в том числе, относящихся к разряду «мелочей».

К таким *обоснованным и документально подтвержденным* «мелочам» могут быть отнесены, например, потери холостого хода в трансформаторах  $\Delta W_{ХХдоп}$ , обусловленные значительным сроком эксплуатации.

В результате накопленного опыта по оценке состояния силовых трансформаторов распределительных, в том числе городских, электрических сетей Ивановской области установлено, что относительное значение  $\Delta W_{ХХдоп}$  составляет до 0,3-0,4 %.

Современные методики не учитывают объективно сложившуюся ситуацию со значительной величиной систематической погрешности  $\Delta W_{Сч}$  в виде недоучета отпущенной потребителям электроэнергии индукционными электросчетчиками. Оценки относительной величины  $\Delta W_{Сч}$  по нескольким городским электрическим сетям Ивановской области показали, что значение этой погрешности, относительно суммарного отпуска электроэнергии, достигает 2,5-5,5 %, что хорошо согласуется с данными измеренных значений различными авторами и статистическими данными многих электрических сетей.

Приведенные результаты анализа и расчета только двух (дополнительных к перечню составляющих по предлагаемым Минпромэнерго методикам) составляющих  $\Delta W_{НОРМ}$  показывает, что реальное полное значение норматива потерь может отличаться от расчетного значения на 3-6 % в большую сторону.

Это значение, по мнению авторов, и должно использоваться для технико-экономического обоснования включения в тариф на электроэнергию инвестиционной составляющей для совершенствования (модернизации) схемы сети и системы учета электроэнергии.

УДК 621.311.925:681.3

В.А. ШУИН, д.т.н., профессор, А.Ю. МУРЗИН, к.т.н., доцент,  
А.С. ЛИФШИЦ, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Физико-математическое моделирование процессов функционирования устройств релейной защиты и автоматики**

При разработке, проектировании, наладке, а также в процессе эксплуатации современных устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС) часто возникает необходимость в исследовании и оценке эффективности их функционирования в условиях электромагнитных переходных процессах при внутренних и внешних коротких замыканиях (КЗ) и в других аварийных режимах. В некоторых случаях эта задача решается проведением натурных экспериментов или с использованием методов физического моделирования исследуемых электроэнергетического объекта (ЭЭО) и УРЗА. Однако в действующих электроустановках проведение натурных экспериментов возможно далеко не всегда, а возможности применения физического моделирования ограничены рядом свойственных ему недостатков: сложностью изготовления требуемых для испытаний различных УРЗА физических моделей исследуемых ЭЭО, невысокой производительностью исследований, трудностями вариации параметров модели и др. Поэтому в настоящее время для исследований электромагнитных переходных процессов в ЭЭС и ЭЭО, как правило, применяется математическое моделирование на ЭВМ. В то же время математическое моделирование УРЗА возможно только в тех случаях, когда известны внутреннее устройство, принцип действия и алгоритмы функционирования УРЗА. В настоящее время объекты электроэнергетики в основном оснащаются современными УРЗА на микропроцессорной элементной базе, алгоритмы функционирования которых представляют коммерческую тайну.

Учитывая изложенное, в технике релейной защиты наиболее эффективным представляется использование комбинированного способа - физико-математической имитации режимов функционирования комплексной системы «электроэнергетический объект – УРЗА». При использовании указанного способа рассчитанные на ЭВМ с использованием системы моделирования временные зависимости входных токов и напряжений для заданных объектов и условий программно-техническим способом преобразуются во входные сигналы исследуемого УРЗА в реальном масштабе времени.

Для организации физико-математического моделирования в указанных целях использован широко распространенный в отечественной электроэнергетике испытательный прибор «Ретом-41» (НПП «Динамика») и разработанная на кафедре АУЭС ИГЭУ версия системы имитационного моделирования для целей релейной защиты *SimRZ*. Совместимость и обмен сигналами между прибором «Ретом-41» и системой моделирования *SimRZ* обеспечивается через файлы данных, сформированных в соответствии с международным форматом «COMTRADE».

В.А. ШУИН, д.т.н., профессор, А.О. НАСОНОВ, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Моделирование функционирования системы «электроэнергетический объект – устройство релейной защиты» в установившихся аварийных режимах**

Комплексное моделирование функционирования устройств релейной защиты и автоматики как одной из составных частей электроэнергетической системы актуально как при решении проектных задач, так и при автоматизированном анализе аварийных ситуаций в электрической части энергообъектов. В настоящий момент не существует специализированных программных продуктов, предназначенных для решения указанной задачи. Универсальные пакеты, такие как MatLab, не достаточно удобны для практического применения, поскольку с одной стороны, не имеют специализированных средств для формирования модели ЭЭС и контроля процесса моделирования, а с другой стороны требуют подробного изучения предоставляемых инструментальных средств.

Разрабатываемый программный комплекс, решающий рассматриваемую задачу, можно представить в виде трёх основных составляющих подсистем:

подсистема управления моделированием;

подсистема моделирования ЭЭС;

подсистема моделирования устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА).

Необходимо отметить, что в общем случае модель ЭЭС и модели УРЗА совместно образуют функциональную схему, т.к. процессы в модели УРЗА не влияют на электромагнитные процессы в ЭЭС и соответственно не учитываются при формировании модели последней. Благодаря этому существенно упрощается внутренняя структура программного комплекса в целом.

В число основных задач подсистемы управления входят: формирование и обеспечение работы функциональной схемы, сбор и обработка результатов моделирования.

Подсистема моделирования ЭЭС содержит: графический редактор схемы ЭЭС, подпрограмму формирования модели ЭЭС и подпрограмму расчёта текущего режима. Моделирование выполняется с использованием системы фазных координат, что позволяет исследовать режимы со сложной несимметрией.

Данные, полученные от подсистемы моделирования ЭЭС на текущей итерации цикла моделирования, передаются компонентам, моделирующим УРЗА, результаты работы которых, в свою очередь, могут быть использованы на следующей итерации для изменения состояния модели ЭЭС.

## **Разработка алгоритма функционирования централизованного устройства сигнализации замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ на микропроцессорной базе**

Целью настоящей работы является разработка и исследование алгоритма централизованного устройства сигнализации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) на микропроцессорной базе для электрических сетей 6–10 кВ, работающих с компенсацией емкостного тока.

В работе решались следующие основные задачи:

1. Разработка алгоритма цифровой фильтрации входных величин – токов и напряжения нулевой последовательности.
2. Разработка алгоритма идентификации присоединения с ОЗЗ.
3. Проведение исследований на математических моделях алгоритмов цифровой фильтрации входных сигналов и идентификации поврежденного присоединения в переходных и установившихся режимах ОЗЗ.

Работа алгоритма идентификации поврежденного присоединения реализует принцип действия устройства селективной защиты «СПЕКТР» [1], основанный на определении направления мощности свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ для заданной части спектра токов  $i_0$  и производной напряжения нулевой последовательности  $du_0/dt$  в переходных режимах ОЗЗ и направления мощности высших гармонических составляющих в заданном диапазоне частот указанных входных информационных величин в установившихся режимах ОЗЗ.

Эффективность работы математической модели алгоритма функционирования микропроцессорной защиты от ОЗЗ проводилась с использованием реальных сигналов в каналах тока и напряжения защиты при всех разновидностях ОЗЗ (однократных самоустраняющихся, прерывистых, перемежающихся, установившихся), при различных режимах заземления нейтрали сети (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали, высокоомное заземление нейтрали). Сигналы для проверки эффективности работы алгоритма получены на физической модели кабельной сети и методами математического моделирования в системе MATLAB.

Анализ результатов работы предложенного алгоритма в различных режимах работы не выявил ни одного неправильного действия защиты.

### **Литература**

1. **Принципы** выполнения микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков, А.Ю. Мурзин и др.: Сб. докл. науч.-практич. конф., посвященной 70-летию ОРЗАУМ института «Энергосетьпроект». – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – С. 100–105.

## **Электротехнический комплекс генерирования электроэнергии на топливных элементах**

Энергетика и транспорт в настоящее время имеют ряд серьезных проблем и, прежде всего, сырьевых и экологических. В ряде стран встает вопрос об использовании альтернативной энергии, и наибольший интерес в последние годы проявляется к исследованиям и разработкам в области топливных элементов.

Разрабатываемый комплекс представляет собой автономную энергоустановку с вырабатываемой мощностью 50кВА. Главные преимущества такого комплекса – умеренные капитальные затраты на изготовление, быстрый ввод в эксплуатацию, сравнительно простое обслуживание и отличные экологические характеристики.

Комплекс состоит из батареи топливных элементов (БТЭ), импульсного преобразователя напряжения с гальванической развязкой, трёхфазного инвертора напряжения и выходного фильтра.

Значение выходного напряжения БТЭ уменьшается при увеличении значения тока потребляемого нагрузкой, что является главным их недостатком. Импульсный преобразователь напряжения, подключённый к выходным зажимам БТЭ, предназначен для поддержания в заданном диапазоне изменения напряжения на конденсаторной батарее трёхфазного инвертора напряжения. Рабочая частота импульсного преобразователя составляет 25 кГц, благодаря чему удаётся добиться высокого значения его КПД (97-98 %). Для обеспечения гальванической развязки между топливным элементом и потребителем в состав установки входит высокочастотный трансформатор.

Результаты имитационного моделирования разрабатываемой энергоустановки показали, что она обеспечивает стабильное выходное напряжение ( $380 \text{ В} \pm 10 \text{ В}$ ) с низким значением коэффициента гармонических искажений ( $K_{ги} < 3 \%$ ) при максимальной выходной мощности 50 кВА.

Для реализации физической модели комплекса авторами разработан симулятор характеристик топливных элементов (ТЭ), основанный на управляемом импульсном преобразователе постоянного тока. В алгоритм работы его системы управления заложена электрохимическая модель ТЭ, учитывающая его статические и динамические характеристики. Указанный симулятор имеет на зажимах нагрузки те же характеристики выходной мощности, что и реальная система. Это позволяет на этапах исследования, проектирования и реализации автономных систем электропитания на основе ТЭ отказаться от использования как самих элементов, так и дорогостоящих сопутствующих систем.

## **СЕКЦИЯ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 004.31

Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор, В.А. СУВОРОВ  
(ИГЭУ)

### **Аналитическая обработка действий пользователя в среде Web-обучения ГИПЕРТЕСТ 2.0**

Применение методов Web-OLAP, ориентированных на решение задач анализа процессов и результатов обучения, позволяет дать ответ на следующие вопросы.

- Как распределены дефекты подготовки на оверлейной модели пользователя?

- Какова дискриминативность и надежность процедур контроля?

- Как соотносятся результаты подготовки студентов по различным программам (или результаты по одной и той же программе по годам и/или группам студентов)?

- Как соотносится субъективная (выраженная в количестве баллов) и объективная (выраженная средним временем подготовки ответа) сложности вопросов контроля?

- Какова эффективность процедур тренажа, выраженная отношением количества правильных ответов (с возможной фильтрацией по концептам онтологической модели) в режимах тренажа и контроля?

- Какова эффективность помощи в режиме тренажа, выраженная отношением процента активизированных ссылок помощи к количеству правильных ответов?

- Какова эффективность управления навигацией, выраженная отношением процента активации рекомендованных ссылок к оценке результатов подготовки?

С учетом содержательного аспекта Web-OLAP, можно считать актуальной задачу разработки хранилища и средств OLAP, которые удовлетворяют следующим требованиям.

- Наличие программного интерфейса заполнения хранилища;

- Наличие пользовательского интерфейса для построения регламентированных и нерегламентированных запросов к хранилищу данных;

- Оперативное выполнение запросов;

- Открытые спецификации на интерфейсы, сервисы и поддерживаемые форматы данных;

- Минимальный трафик «клиент-сервер»;

- Нулевое администрирование клиента OLAP, простота освоения инструментов анализа;

- Наглядное представление результатов выполнения запросов средствами деловой графики.

В докладе рассмотрены вопросы разработки и реализации средств Web-OLAP, отвечающих перечисленным требованиям, в ГИПЕРТЕСТ 2.0. Приведены примеры применения предложенных средств.

## Оценка надежности контроля знаний в среде разработки программ web-обучения ГИПЕРТЕСТ

Оценка надежности контроля знаний в системах компьютерного обучения приобретает особую актуальность в связи с тем, что большинство заданий контроля имеет рутинную форму выбора одной или нескольких альтернатив из числа предложенных или же упорядочения заданного множества элементов ответа. Такая форма представления облегчает алгоритмизацию процедур обработки ответа, однако снижает надежность процедур контроля, так как допускает возможность банального «угадывания» правильного ответа. В докладе рассматриваются разработанные и реализованные в среде разработки программ web-обучения ГИПЕРТЕСТ 2.0 методы оценки надежности, позволяющие автору процедур контроля оценить вероятность того, что получить положительную оценку сможет только тот, кто знает материал.

В основу предлагаемого подхода положено понятие надежности вопроса, т.е. вероятности неправильного ответа при незнании. Аналитические выражения для надежности типовых вопросов по их характеристикам могут быть получены методами теории вероятностей. Полагая события, заключающиеся в выборе ответа на вопрос, независимыми, можно считать, что вероятность угадывания определяется выражением (1):

$$\prod_{i=1}^k p_i \quad (1)$$

где  $p_i$  - вероятность угадывания правильного ответа на  $i$  – тый вопрос.

Тогда надежность теста определится выражением (2):

$$1 - \prod_{i=1}^k p_i \quad (2)$$

Если правильный ответ на каждый вопрос оценивается определенной суммой баллов и определено минимальное количество баллов, необходимых для получения положительной оценки, это же соотношение можно использовать и для оценки вероятности получения положительной оценки при незнании, включив в множество вопросов только те, у которых отношение надежности к количеству баллов минимально, а общая сумма баллов превышает границу положительной оценки.

Изложенный подход иллюстрирован примерами его применения в среде разработки программ web-обучения ГИПЕРТЕСТ 2.0.

УДК 004.31

А.В. МЕНАГАРИШВИЛИ, магистрант  
Е.Р. ПАНТЕЛЕЕВ, д.т.н., профессор  
(ИГЭУ, кафедра программного обеспечения компьютерных систем)

## **Инструментальные средства анализа книгообеспеченности учебного процесса в ИГЭУ**

Одним из важнейших показателей при аттестации вуза является оценка книгообеспеченности дисциплин, а также ее детализация для внутренней оценки деятельности вуза, которая включает показатели книгообеспеченности (по дисциплине, специальности, кафедре, вузу), показатели используемости (по тематике, дисциплине, специальности, кафедре, вузу), показатели обновляемости (по тематике, по специальности).

В состав используемой в библиотеке ИГЭУ библиотечно-информационной системы «Руслан» входит модуль «Книгообеспеченность», обладающий рядом недостатков: нерасширяемость архитектуры, использование локальных баз данных с информацией о структуре учебного процесса вуза, что приводит к некорректности результатов при расчете показателей книгообеспеченности, отсутствие возможности расчета показателей используемости и обновляемости фонда библиотеки. Целью работы является разработка и программная реализация инструментальных средств анализа, лишенных указанных недостатков.

В докладе рассматривается трехуровневая распределенная архитектура системы анализа книгообеспеченности. В уровень данных входят базы данных, содержащие информацию о книгах в библиотеке ИГЭУ и об учебном процессе. К функциональному уровню относятся модули анализа книгообеспеченности, реализованные в виде динамически подключаемых компонентов с открытым интерфейсом. Для доступа к данным о книгах в соответствии со стандартом «Information Retrieval (Z39.50): Application Service Definition and Protocol Specification» на языке C# был создан клиентский компонент протокола Z39.50, который впоследствии был успешно внедрен в систему. Уровень представления разработанного приложения включает веб-сайт, созданный на основе технологии ASP.NET, реализующий следующие функции:

- поиск литературы в библиотеке ИГЭУ;
- сервис аутентификации пользователей и авторизация по ролям;
- просмотр и редактирование списков учебной литературы;
- просмотр результатов анализа книгообеспеченности, используемости и обновляемости библиотечного фонда.

Основным результатом выполненных исследований является система анализа книгообеспеченности учебного процесса. В настоящее время разработанный продукт находится в тестовой эксплуатации в информационном отделе библиотеки ИГЭУ.

УДК 004.942.: [544.27:544.015.5]

В.В. ПЕКУНОВ, к.т.н., инженер, Ф.Н. ЯСИНСКИЙ, д.ф.-м.н., профессор,  
М.А. НИКОЛАЕВА, студентка, К.А. ПОНОМАРЕВА, студентка  
(ИГЭУ)

## Новый подход к моделированию динамики и кинетики некоторых многофазных систем

При моделировании процессов образования и распространения загрязнителей в атмосфере обычно рассматриваются многофазные системы, включающие многокомпонентные несущую и капельную фазы, а также фазу твердых частиц. Особо отметим проблемы: а) простоты вычисления скорости капельных компонентов; б) адекватности распределений капель (особенно сложно моделировать распределения с разрывами). Известные способы решения данных проблем дают хорошую точность лишь при высоких вычислительных затратах.

Предлагается новая многофазная многокомпонентная модель, учитывающая: динамику водяного пара и капель, конденсацию и испарение, поглощение (и высвобождение) газов каплями. Модель имеет следующие особенности: а) дифференциальные уравнения скорости и колебания капельных компонентов заменены алгебраическими, что упрощает расчет; б) имеется алгоритм, позволяющий рассчитать кусочные распределения разных порядков точности (линейные при полном заполнении компонентов и равномерные при частичном заполнении, когда дополнительно вычисляется положение начала или конца незаполненного участка). Параметры распределения капель вычисляются динамически (с помощью интерполяции) по текущим значениям плотности и концентрации компонента. Особо обрабатываются случаи, потенциально приводящие к появлению разрывов распределения, например, поступление капель в пустую ячейку.

Авторами был проведен ряд численных экспериментов по проверке адекватности модели. Погрешности расчета скорости незначительны, время стабилизации скорости для большинства капель не превышает 0,8 с, что снижает точность расчета лишь в нестационарных задачах. Относительные погрешности расчета плотности и концентраций загрязнителя приемлемы (до 2÷18 % и 15÷35 % соответственно). Временные затраты в 540 раз меньше по сравнению с лагранжевой моделью (1000 капель). Тенденции изменения погрешности (в различных условиях эксперимента) подтвердили адекватность предложенного подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования и науки (грант РНП.2.2.1.1.7280).

### Литература

1. **Пекунов В.В.**, Ясинский Ф.Н. Математическая модель микроклимата в производственных помещениях с повышенной влажностью // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – №2. – С. 128-133.

## Нормы собственных функций смешанных задач для оператора Лапласа на прямоугольном треугольнике с углом $30^\circ$

Для  $s=0,1,2,3$  рассматривается спектральная граничная задача

$$\Delta u + \lambda u = 0 \text{ на } D, \quad ku + (1-k) \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0 \text{ на } \partial D, \quad (A_s)$$

где  $s=2i+j$  при  $i$  и  $j$  равных 0 или 1;  $D$  – треугольник с вершинами  $A(0,0), B(2\pi/3,0), C(\pi/2, \pi\sqrt{3}/6)$ ;  $\nu$  – нормаль к границе  $\partial D = AB \cup BC \cup CA$  треугольной области  $D$ ;  $k=i$  на  $CA$  и  $k=j$  на  $AB \cup BC$ .  $(A_0)$  есть задача Неймана,  $(A_3)$  – задача Дирихле.

При всех  $s=0,1,2,3$ ,  $(m,n) \in \mathbf{Z}^2$  и  $(x,y) \in D$  полагаем  $e_{mn}(s) \equiv e_{mn}(x,y,s) = \cos(mx - \pi i/2) \cos(ny\sqrt{3} - \pi j/2)$ . Введем на  $D$  систему функций  $U_s = \{u_{mn}(s) | (m,n) \in \mathbf{Z}^2, (-1)^{m+n} = 1 \text{ и } i \leq m \leq n - j\}$ ,

где  $u_{mn}(s) = e_{mn}(s) + (-1)^j e_{pq}(s) + (-1)^{i+j} e_{rt}(s)$  при  $p = (3n - m)/2$ ,  $q = (n + m)/2$ ,  $r = (3n + m)/2$ ,  $t = (n - m)/2$ .

**Теорема 1.** Для любого  $s=0,1,2,3$   $U_s$  есть полная ортогональная в  $L^2(D)$  система собственных функций задачи  $(A_s)$ , причем любой собственной функции  $u_{mn}(s) \in U_s$  соответствует собственное число  $\lambda_{mn}(s) = m^2 + 3n^2$ ; справедлива формула

$$\|u_{mn}(s)\|^2 = \pi^2 \theta_{mn} / (8\sqrt{3} \gamma_m \gamma_n), \quad (1)$$

где  $\|\bullet\|$  есть норма в  $L^2(D)$ ,  $\gamma_0 = 1/2$  и  $\gamma_m = 1$  при  $m \neq 0$ ;  $\theta_{mn}$  есть количество нулей среди чисел  $0, m - n, m^2 + n^2$ .

В ряде работ ([1] и др.) исследуются ортогональность и полнота некоторых близких к  $U_s$  систем собственных функций. Метод доказательства теоремы 1, разработанный в [2], позволил наряду с установлением ортогональности и полноты систем  $U_s$  вычислить нормы (1).

### Литература

1. **Prager M.** // Appl. Math., 1998, v.43, p.311-320; 2001, v.46, p.231-239.
2. **Томина И.В.** Регуляризованные следы степени оператора Лапласа с потенциалом на треугольниках: Дис... канд. физ.-мат. наук. – Владимир: ВГПУ, 1995.

УДК 511.6

Э.Т. АВАНЕСОВ, к.ф.-м.н., профессор, В.А. ГУСЕВ, к.ф.-м.н., профессор  
(ПГТУ, ИГЭУ)

## Основные единицы алгебраических полей

Одной из центральных задач теории алгебраических полей является определение системы основных единиц, используемых при решении многих классов диофантовых уравнений.

Рассмотрим неприводимое диофантово уравнение

$$f(x, y) = x^n + \sum_{i=1}^n p_i x^{n-i} y^i = A, \quad (1)$$

где  $A$  и все  $p_i$  – целые рациональные числа.

В силу знаменитой теоремы Туэ уравнение (1) имеет лишь конечное число решений в целых числах, а на основании известных результатов [1,2] для его возможных целых решений  $(x, y)$  справедлива оценка

$$\max(|x|, |y|) < C_1 \cdot |A|^{C_2}, \quad (2)$$

здесь  $C_1$  и  $C_2$  эффективно определяются по коэффициентам формы  $f$ .

Очевидно, применение оценки (2) на конкретных примерах приводит практически к недостижимому объёму вычислений.

В связи с этим для фактического определения решений уравнения (1) возникла настоятельная необходимость развития конструкций, использующих локальный метод Сколема, опирающийся на знание основных единиц.

Известная конструкция Биллевича [3] носит геометрический характер, она заключается в построении последовательностей точек  $\{1\}^{(\kappa)}$ , приводящих к системе основных единиц, и менее эффективна при больших значениях компонент единиц.

Разработанная нами алгебраическая модификация метода Биллевича позволяет получить явные оценки компонент  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n-1$ ) единиц  $x_0 + x_1 \lambda + \dots + x_{n-1} \lambda^{n-1}$ , где  $\lambda$  – корень уравнения  $f(\lambda, 1) = 0$ ,  $M_n(\lambda)$  – модуль, порождённый степенями  $\lambda$ , т.е.  $M_n(\lambda) = Z\{1, \lambda, \lambda^2, \dots, \lambda^{n-1}\}$ .

Определяемый таким путём набор единиц позволяет осуществить непосредственное построение системы основных единиц.

### Литература

1. **Спринджук В.Г.** Об оценке решений уравнения Туэ // ИАН СССР, сер. Математика. – 1972. – Т. 36. – №4. – С. 712–741.
2. **Фельдман Н.И.** Приближения алгебраических чисел. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 199 с.
3. **Биллевич К.К.** Теорема об единицах алгебраических полей  $n$ -го порядка // Мат. сборник. – 1964. – Т.64(106). – №1. – С.145–152.

## **Функциональная схема автоматизированной системы ведения организационных процессов**

Целью создания автоматизированной системы ведения организационных процессов АСВОП является повышение эффективности взаимодействия (организованности) сотрудников организации, представляемое как информационный ресурс её развития.

Система АСВОП реализована путем модульного построения. Основные модули:

1. Модуль электронной почты. Реализует возможность коммуникаций путем обмена сообщениями и документами как в режиме онлайн, так в режиме оффлайн.
2. Модуль обмена мгновенными сообщениями. Реализует возможность коммуникаций путем обмена мгновенными сообщениями в режиме онлайн.
3. Модуль обмена и управления документами. Реализует функции создания, согласования, контроля исполнения, хранения и поиска порядкительных документов в организационной структуре.
4. Модуль управления организационными документами. Реализует функции описание формальной структуры организации через должностные инструкции, положения и т.п., а также их оперативное изменение под требования внешней среды по результатам анализа организационных изменений.
5. Модуль создание тезауруса. Реализует функции формирования онтологии организации и контроля соответствия содержания всех документов тезаурусу.
6. Модуль коллективного принятия решений. Реализует функции коллективной работы над решением проблем путем проведения совещаний, мозговых штурмов, опросов, голосований в режиме онлайн и оффлайн.
7. Модуль форум проблемных ситуаций. Реализует функции публикации возникающих проблемных ситуаций для сбора и анализа возможных решений, предлагаемых сотрудниками организации
8. Модуль описания проблемных ситуаций. Реализует функции классификации и ведения хранилища всех возникающих проблемных ситуаций в организации.
9. Модуль анализа организационных изменений. Реализует функции анализа структурных преобразований путем формирования и представления трех групп характеристических показателей, обеспечивающих наблюдаемость организации: структурно – динамических,

структурно – топологических и характеристик функционирования элементов и подсистем организации

10. Модуль описания и хранения ТООР (типовых организационно-управленческих решений). ТООР – статистически определенная оптимальная структура, соответствующая максимальной эффективности на данном классе проблемных ситуаций. Реализует функции ведения хранилища организационных решений проблем, возникающих перед организацией, их анализ и предложение оптимальных организационных решений при повторном возникновении проблемных ситуаций.
11. Модуль администрирования. Реализует функции ввода, изменения, удаления данных из базы данных программы,
12. Модуль распределения функций. Реализует функции ведение словаря и иерархии функции организации, а также распределение между сотрудниками – вершин дерева функций.

УДК 005.7

А.В. ГВОЗДЕВ, аспирант, А.А. БЕЛОВ, к.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## **Методика автоматизированной оценки организационных процессов**

С синергетической позиции оценку развития организаций необходимо производить на основе закономерностей создания и изменения структур, возникающих в процессе взаимодействия организационных элементов. Одним из условий проведения такого анализа является наделение сотрудников организации свободой выбора информационного взаимодействия. Это общее и необходимое для самоорганизации условие.

Общение сотрудников организации посредством компьютерной сети позволяет использовать возможности сетевых программных средств осуществлять постоянный контроль формальных и неформальных коммуникаций.

На основе данных контроля работы компьютерной сети в автоматическом режиме формируются исходные матрица  $A = |a_{ij}|$ , используемые для анализа организационных процессов:

- $A_1$ - матрица «Количество символов», где  $s$  – количество символов, полученных  $i$ -м сотрудником от  $j$ -ого сотрудника за время  $t$ ;
- $A_2$  – матрица «Количество сообщений», где  $a_{ij}=p_{ij}$  – количество сообщений, полученных  $i$ -м сотрудником от  $j$ -го сотрудника за время  $t$ ;
- $A_3$  – матрица «Среднее число символов в сообщениях», где  $a_{ij} = k_{ij} / p_{ij}$ ;

- $A_4$  – матрица «Продуктно-ресурсная связь»,  $a_{ij}=r_{ij}$  – число продуктов информационной деятельности, произведенных  $i$ -м сотрудником для  $j$ -го сотрудника за время  $t$ ;
- $A_5$  – матрица «Эффективности сотрудников» где  $a_{ij}=e_{ij}$  – степень удовлетворения  $j$ -го сотрудника продуктом информационной деятельности  $i$ -го сотрудника.

На основании полученных матриц осуществляется анализ структурных преобразований путем формирования и представления трех групп характеристических показателей, обеспечивающих наблюдаемость организации:

- структурно – динамические характеристики, позволяющие наблюдать процесс структурных преобразований при самоорганизации.
- структурно – топологические характеристики, позволяющие отображать сформировавшиеся структуры (аттракторы)
- характеристики функционирования элементов и подсистем организации.

При возникновении проблемы  $W$  в соответствии с принципом самоорганизации возникает коллегиальная структура  $G$ , обеспечивающая решение данной проблемы с эффективностью  $\Xi$ . Эта структура регистрируется посредством структурно-топологических характеристик. При последующих появлениях похожей проблемы эта операция повторяется. Формируется выборка проблемных ситуаций и их организационных решений, на основании которой определяется наиболее оптимальная  $G_{opt}$ , соответствующая  $\Xi_{max}$  и представляемая как типовое организационно-управленческое решение (ТОУР). Так создается база ТОУР, позволяющая использовать опыт организации в виде хранилища, сочетать процессы организации и самоорганизации, повышать, в конечном счете, интеллектуальный капитал фирмы.

УДК 338.364

А.А. БЕЛОВ, к.т.н., С.О. ЕЛОХИН, студент  
(ИГЭУ)

## **Методические и инструментальные средства информационного обеспечения систем менеджмента качества**

Основой системы менеджмента качества (СМК), как любой системы управления, является информационное обеспечение. Для создания таких систем мониторинга, контроля и анализа разработан инструментальный комплекс. При его проектировании были учтены основные принципы менеджмента качества, в частности системный и процессный подходы.

Данные инструментальные средства позволяют моделировать систему производственного процесса, что позволяет обеспечить универсальность подходов к внедрению и адаптации СИОУ к СМК производства со своей спецификой технологического процесса.

Все факторы – технологические, сырьевые, трудовые и пр., – собраны в единой базе данных системы, имеющей такие характеристики, как:

- специфическая организация данных, интегрирующая статические (описывающие модель производственного процесса) и статистические (накапливаемая статистика по всем выделенным факторам) данные, что обеспечивает согласованность накапливаемых данных с моделью производственного процесса;
- поддержка технологии открытых систем и интерфейсов открытого доступа к источникам данных, что позволяет обеспечивать возможность доступа к данным из внешних модулей обработки данных на основе готовых решений;
- возможность построения моделей с гибкой дискретной производственной системой.

На основе сведений о качестве продукции измеряется результативность процессов. В соответствии с процессным подходом предлагается рассматривать каждую операцию производственного процесса как потребителя продукции с одной стороны, и поставщика сырья с другой. На основе этого определяется эффект (результативность) функционирования всех операций производства. На этом принципе построена методика поиска причин отклонений и брака в процессах. Помимо статистики факторов, накапливаются сведения, необходимые для расчета затрат. Эти сведения могут поступать в модуль расчета и мониторинга эффективности производственных процессов.

Все накапливаемые сведения необходимы не только для контроля качества продукции и процессов, но и для промышленно-статистического анализа и анализа причин возникновения отклонений в процессе и брака в изделиях.

Анализ причин отклонений, которые могут иметь как количественный, так и качественный характер, основан на методах корреляционного и дисперсионного анализа. Для проведения такого анализа предложен алгоритм извлечения данных, имеющих связь с моделью процесса. Этот алгоритм позволяет проследивать весь цикл производства от сырья до готового изделия. Построенные таким образом данные, позволяют при обработке соответствующими методами сопоставлять между собой все факторы на каждой стадии производства и выявлять их влияние на качество изделий.

## **Документационное обеспечение системы менеджмента качества на основе системной методологии**

В настоящее время в условиях открытого рынка актуальной становится задача управления качеством. Предприятия и организации проходят сертификацию и получают сертификаты соответствия системы менеджмента качества требованиям серии стандартов ИСО 9001.

Одной из наиболее сложных задач разработки системы менеджмента качества (СМК) и при ее сертификации является создание документационного обеспечения СМК. Существуют различные стандарты, которые регламентируют порядок и требования к формированию различного уровня документов, составляющих основу всей документной системы. Однако в настоящее время недостаточна методическая основа создания и функционирования этой документной системы.

В данной работе предлагается системная методология, обеспечивающая единый подход к формированию как отдельных документов так и документной системы в целом.

Так, например, важнейшей составляющей этой системы является классификатор. В основе этого классификатора заложены системный и процессный подходы, как одни из основных принципов формирования СМК. Согласно этим принципам классификатор разрабатывается на базе функциональной и целевой декомпозиции, как основных операций системного анализа. На основе классификатора осуществляется индексация и формирование метаданных.

В работе определены пути объединения данной иерархической классификации с иерархией основных документов, представленных в ISO/TR 10013. Точно также на основании системного подхода проработаны состав и содержание документов, характеризующих отдельные процессы. С точки зрения системной методологии, предложено формирование основных документов СМК: политики и целей в области качества, руководства по качеству, документированных процедур, рабочих инструкций, записей и форм.

Данная методология позволяет обеспечить целостность документационного обеспечения СМК.

## **Опыт проведения мониторинговых исследований с использованием пакета SPSS**

Одним из основных направлений деятельности Межрегионального маркетингового центра «Иваново» является проведение маркетинговых исследований по изучению потребительского поведения, конкурентов, исследованию ассортиментной политики рынка товаров и услуг и т.д. В связи с повышением требований заказчиков к качеству выполнения проектов на проведение исследований, в организации необходимо провести пересмотр методик, применяемых при выполнении работ по реализации проектов. В последнее время все большую популярность на рынке предоставления маркетинговых услуг приобретает использование телефонного опроса как метода проведения исследований в различных областях.

В дипломном проекте проводится разработка информационной системы планирования, проведения телефонного опроса и анализа результатов с использованием пакета SPSS.

SPSS – это пакет прикладных программ, предназначенный для профессиональной обработки статистических данных методами математической статистики, анализа и выявления статистических закономерностей и зависимостей, графической, математической и аналитической обработки информации. Он используется сотрудниками организации ММЦ «Иваново» для:

- вычисления показателей описательной статистики;
- построения диаграмм различной сложности;
- построения таблиц сопряженности.

Функции SPSS достаточно обширны, но в настоящее время используются лишь некоторые из них. Это объясняется отсутствием методик и недостаточной квалификацией сотрудников.

В работе предлагается совершенствование процесса планирования и проведения мониторинговых исследований, хранения информации, полученной от нескольких интервьюеров в единой базе данных, анализ собранных данных с использованием пакета SPSS. Кроме применяемых в настоящее время функций пакета предлагается использовать следующие методы анализа:

- корреляционный параметрический и непараметрический анализ для выявления тесноты связи между явлениями;
- множественный регрессионный анализ.

Разработанная информационная система позволит эффективнее организовать процесс проведения мониторинговых исследований и получить совокупность показателей, дающих целостную картину об изучаемом объекте.

## Разработка средств выбора оптимального местоположения объектов в среде ГИС

Выбор мест для размещения технических объектов на территории города, осуществляемый в процессе градостроительной деятельности, можно рассматривать как задачу многокритериальной оптимизации. Авторами развивается подход, предложенный в [1], в котором для постановки и решения данной задачи используются методы и средства пространственного моделирования, реализованные в среде ГИС. В рамках этой работы реализован модуль ГИС, позволяющий решать задачи выбора оптимального местоположения множества объектов в следующей постановке:

Вся территория города представляется как некоторое сплошное полигональное покрытие  $S$ :

$$S = \{s_n \mid n = \overline{1, N}\}, \quad \bigcap_N s_n = \emptyset, \quad \bigcup_N s_n = \bar{s}, \quad (1)$$

где  $S_n$  – площадные пространственные объекты (полигоны), эквивалентирующие свойства моделируемой пространственно-распределенной системы в виде вектора параметров  $W_n$ ,  $\bar{s}$  – площадной объект, охватывающий всю территорию. Каждый вариант решения задач размещения для одного объекта сводится к выбору полигона  $S_i$ , в котором он может быть размещен. При этом изменяются значения параметров вектора  $S_i$  и, возможно, других полигонов (при наличии связей между ними). Выбор оптимального решения для одного объекта сводится к перебору всех возможных  $N$  вариантов размещения объекта и сопоставления получающихся в каждом случае значений  $W_i$  с целью нахождения максимума критериальной функции:

$$F(W) \rightarrow \max, \quad W = \bigcup_n W_n \quad (2)$$

При размещении множества объектов задача переходит в класс NP-трудных задач. Для снижения ее размерности в модуле реализован метод пространственной структуризации покрытия  $S$ , позволяющий исключать группы неперспективных вариантов размещения объектов.

### Литература

1. **Косяков С.В.** Анализ и планирование развития территориально распределенных технических систем на основе геоинформационных технологий / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2004. –144 с.

## **Разработка имитационной модели транспортных потоков в среде ГИС**

Возрастание интенсивности движения транспорта в городах повышает актуальность задач моделирования транспортных потоков с целью изучения возможностей их оптимизации. В управлении геоинформационных технологий ИГЭУ в среде ГИС разработаны транспортная модель города Иваново, включающая описание всех участков улиц с характеристиками условий проезда, и программные средства построения оптимальных маршрутов проезда между произвольными точками на территории города. Эти разработки нашли практическое применение в рамках ряда проектов по планированию перевозок, выполненных для организаций города. В настоящее время на основе этих разработок создается имитационная модель, позволяющая изучать процессы и условия возникновения транспортных пробок на улицах города Иваново.

Модель включает транспортный граф, на котором указывается множество истоков и стоков транспортного потока. Их пользователь может задавать на карте города в среде ГИС, Истокам назначаются средняя производительность (количество выезжающих автомобилей в минуту), стокам – коэффициент притягательности. Имитация осуществляется в дискретном времени следующим образом. На каждом такте для каждого автомобиля рассчитывается новое местоположения с учетом его маршрута и загруженности участков улиц. В источниках случайным образом с учетом производительности генерируются автомобили, которым случайным образом выбираются пункты назначения (стоки). Продвижение автомобиля вперед по маршруту осуществляется только в случае отсутствия перед ним на заданном расстоянии другого автомобиля.

На данном этапе разработаны экспериментальные варианты реализации модели, которые позволяют моделировать движение на отдельных небольших участках города, в условиях отсутствия регулирования движения. В рамках дальнейших исследований планируется повысить размерность решаемых задач и реализовать методы учета регулирования движения и динамического изменения маршрутов при возникновении пробок, что позволит повысить адекватность модели.

## **Автоматизация проектирования логики выполнения операций в информационно-управляющих системах**

Информационно-управляющие системы (ИУС) должны поддерживать выполнение сложных и взаимосвязанных операций. Например, замену оборудования, копирование параметров оборудования, изменение статуса чертежа, утверждение документа и т.д. Встраивание и перенос логики бизнес-операций в существующих системах требует значительных объемов высококвалифицированного труда программистов. Поэтому задача автоматизации проектирования логики ИУС является актуальной.

Для обеспечения возможностей встраиваемости и открытости логики бизнес-процессов необходимо решить следующие задачи:

- Разработать модель построения логики бизнес-операций для информационно-управляющих систем, обеспечивающую возможность переносимости логики на другие ИУС;
- Разработать средства создания и конфигурирования логики выполнения операций для информационно-управляющих систем;
- Разработать модель метаописания данных предметной области для информационно-управляющих систем, использующих встраиваемую логику;
- Разработать технологию создания методов доступа к прикладному интерфейсу информационно-управляющих систем и методов доступа к данным предметной области для их использования в логике управления бизнес-процессами.

В результате решения поставленных задач были созданы программные модули для реализации вышеописанных моделей:

- СОМ-интерфейс логики выполнения бизнес-операций, включающий в себя функционал для настройки логики и для взаимодействия с различными информационно-управляющими системами;
- Дизайнер логики выполнения бизнес-операций, включающий в себя функционал по настройке метаописания данных предметной области и интерфейсы, обеспечивающие создание и отладку правил выполнения бизнес-операций.
- Клиентское приложение, использующее встроенную логику выполнения операций, ориентированное на работу с базой данных предприятия по проектированию объектов электроэнергетики.

В докладе приводятся примеры использования логики бизнес-операций в интегрированной среде проектирования. В перспективе данный механизм может быть применен для встраивания и настройки логики выполнения операций в других информационно-управляющих системах.

## **Интеллектуальная поддержка процесса решения инженерных задач в среде компьютерного обучения на основе сетей Байеса**

Интеллектуальные обучающие системы (ИОС) необходимы при современном подходе в дистанционном образовании. Именно они позволяют индивидуально для каждого студента моделировать и проходить различные курсы обучения. Также ИОС позволяют управлять процессом решения задачи, путем анализа действий пользователя и формирования подсказок. Для этих целей зачастую используются сети Байеса.

Сеть Байеса – это графическая модель для представления вероятностных взаимоотношений на множестве переменных. Использование сетей Байеса совместно с аппаратом математической статистики дает ряд преимуществ для анализа данных. Первое – так как модель отражает зависимости для всех переменных множества, она легко справляется с ситуациями, когда часть данных отсутствует. Второе – сети Байеса могут быть использованы для выявления причинно-следственных зависимостей и, следовательно, для более точного понимания проблем, связанных с конкретной предметной областью. Третье – модель имеет как причинно-следственную так и вероятностную семантику, следовательно она является идеальным средством для совместного представления экспертных знаний (часто служащих источником причинно-следственных зависимостей) и статистических данных. Четвертое – на основе методов Байесовой статистики совместно с сетями Байеса возможно построение достаточно эффективного алгоритма, оптимальным образом использующего информационные и вычислительные ресурсы.

Целью проводимого исследования является разработка и реализация методов интеллектуальной поддержки процесса обучения решению инженерных задач (на примере решения задач инженерной графики). Модель инженерной задачи описывается сетью Байеса, со следующими типами узлов: факты, цели, правила и события. Различные типы узлов необходимы как для управления в процессе решения задачи, так и для формирования модели знаний. Интерфейс пользователя реализован с помощью предметно-инвариантного клиента, поддерживающего события необходимые для сопряжения с моделью задачи. Для вычисления условных вероятностей в сети Байеса используется алгоритм Лауритзена-Шпигельгалтера.

Разработана модель задачи построения прямой, перпендикулярной плоскости. В разработке находится модель предметной области (со всеми возможными задачами), которая позволит управлять процессом обучения в рамках курса начертательной геометрии.

## Оценка постановки управленческого учета с использованием нейросетевого моделирования

**Введение.** Управленческий учет можно определить как процесс идентификации, измерения, сбора, анализа, подготовки, интерпретации и передачи управленческому персоналу информации, необходимой для планирования, контроля и управления текущей производственно-коммерческой деятельности предприятия.

Постановка управленческого учета на предприятии – это комплекс работ по разработке и внедрению в использование набора процедур и правила ведения управленческого учета.

В ходе постановки управленческого учета, как правило, возникают следующие задачи:

1. Определение должностных лиц, которым делегированы полномочия и ответственность за принятие управленческих решений
2. Выделение наборов внешних показателей необходимых для принятия решений
3. Анализ и формализация возможных действий должностных лиц (управлений)
4. Задание контролируемых показателей

Методики их решения достаточно подробно были описаны в соответствующей литературе. В то время как оценке корректности их решения не уделялось должного внимания.

### Постановка задачи.

Целью является установление корректности выбора контролируемых показателей для заданных внешних факторов.

Формализуем задачу. Получение ключевых показателей можно представить следующим образом:

$$F(\overset{\rightarrow}{x}_n, \overset{\rightarrow}{y}_n) = \overset{\rightarrow}{u}_{n+1} ; \quad C(\overset{\rightarrow}{x}_n, \overset{\rightarrow}{u}_n) = \overset{\rightarrow}{y}_n$$

Здесь:

$\overset{\rightarrow}{x}_i$  - вектор, описывающий внешние показатели в момент времени  $i$

$\overset{\rightarrow}{y}_i$  - вектор, описывающий выбранное управление в момент времени  $i$

$\overset{\rightarrow}{u}_i$  - вектор, описывающий контролируемые показатели в момент времени  $i$ ,  $u_0$  – считаем заданным

$C$  – функция, описывающая принятие управленческого решения

$F$  - функция, описывающая поведение изучаемого объекта

Тогда управленческий учет поставлен корректно тогда и только тогда, когда возможно построить функции  $F$  и  $C$  с определенной степенью точности. Если построение таких функций не возможно, следовательно,

контролируемые показатели не определяются заданным управлением и известными внешними параметрами. Чем большая точность достижима – тем более корректно поставлена задача.

**Решение задачи.** Предположим, что на предприятии собиралась необходимая информация. Тогда мы располагаем наборами векторов  $x, y$  и  $u$  за некоторый период времени.

В таких условиях возможно приближенное построение функций  $F$  и  $C$  с использованием нейронной сети используя имеющиеся данные в качестве обучающей выборки. Построение такой функции возможно по «Теореме о полноте». [1]

Полученные функции назовем  $Fm$  и  $Cm$ . Применив их к начальным данным, мы рассчитаем значения новых векторов  $ym$  и  $um$ . Когда такое решение согласуется со статистическими данными, с определенной точностью, мы можем считать постановку корректной.

#### Литература

1. **Колмогоров А.Н.** О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Докл. АН СССР, том 114, с. 953-956, 1957.
2. **Друри К.** Управленческий и производственный учет. – 2003.
3. **Коровин Д.И.,** Логические принципы в организации производства. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2006. – 156 с.

УДК 681.32

Д.О. СОНИН, студент, Б.А. БАЛЛОД, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## Методика разработки документационного обеспечения защиты информации на основе ISO 17999

В условиях динамического развития общества, усложнения технической и социальной инфраструктуры информация становится таким же стратегическим ресурсом, как и традиционные – материальные, энергетические и финансовые.

Основным аспектом ИТ является Информационная Безопасность. Развитие методов организации учебного процесса характеризуется повышенной интенсивностью информационного обмена, внедрением информационных технологий, компьютеризацией информационных технологий, в связи с чем возникает повышенная опасность в виде возможного ущерба тем информационным ресурсам, которые используются информационными технологиями.

Цель данной работы – найти пути совершенствования учебного процесса с учетом современных ИТ и разработать принципы защиты данных технологий.

Задача – построение качественной системы документационного обеспечения защиты информации на основе современных подходов и с учетом требований международного стандарта управления информационной безопасностью ISO 17799.

В результате разработки политики безопасности созданы следующие документы:

- положение о категорировании ресурсов АС;
- порядок обращения с информацией, подлежащей защите;
- методы и средства защиты. План защиты.
- общие обязанности сотрудников организации по обеспечению безопасности информации в защищаемой АС;
- положение о подразделении обеспечения безопасности информации.
- требования по обеспечению непрерывной работы и восстановлению работоспособности подсистем (компонентов подсистем) в том числе инструкции:
  - по допуску сотрудников к работе в АС и наделения их необходимыми полномочиями по доступу к ресурсам системы;
  - по увольнению работников и лишения их прав доступа в систему;
  - по внесению изменений в списки пользователей и изменения их полномочий по доступу к ресурсам АС;
  - по порядку приобретения, установки (внедрения), обновления (модификации), изменения настроек программных и технических средств на всех объектах АС;
  - по действиям различных категорий персонала по ликвидации последствий кризисных (аварийных или нештатных) ситуаций, в случае их возникновения;
  - по организации антивирусной защиты в АС;
  - по организации парольной защиты в АС и другие документы.

Методика создания документов реализована с помощью программного продукта Digital Security Office 2006 – комплексное решение для управления информационной безопасностью. Он включает в себя систему анализа и управления информационными рисками ГРИФ и систему разработки и управления политикой безопасности информационной системы КОНДОР, что позволит удобно и эффективно разрабатывать и управлять политикой безопасности информационной системы компании на основе лучших стандартов (ISO 17799:2000, ISO 17799:2005, ISO 27001, СТО БР ИББС-1.0-2006).

Таким образом, две составляющие управления информационной безопасностью – политика безопасности и анализ рисков – объединены в одном интегрированном продукте.

Методика управления защитой информации Digital Security открывает широкие перспективы по осуществлению консалтинговой деятельности в области защиты информации.

## Использование принципов конструкторско-технологического моделирования при проектировании деталей

В современных условиях для промышленных предприятий остро стоит вопрос сокращения сроков конструкторско-технологической подготовки производства [1]. Для условий мелкосерийного машиностроения решить эту проблему можно путем внедрения принципов конструкторско-технологического моделирования методом унификации конструктивных элементов (КЭ). При реализации такого подхода конструкторско-технологическую модель (КТМ) изделия представляют совокупностью взаимодействующих между собой КЭ, каждый из которых с одной стороны представляет собой комплекс элементарных поверхностей и в то же время определяет во взаимодействии с другими элементами технологического процесса (ТП) изготовления проектируемого объекта [2]. Используя КТМ, можно осуществлять автоматизированный синтез как 3D-модели проектируемого изделия, так и маршрутно-операционного описания ТП его изготовления. Дальнейшее оформление конструкторской документации осуществляется *параллельно* технологическому проектированию, что позволяет сократить сроки освоения новой продукции.

Синтез ТП может выполняться в соответствии с любым из существующих методов, однако, наибольший интерес представляет групповой метод проектирования ТП [3]. Важным этапом такого проектирования является группирование деталей, которое осуществляется в два этапа: первичная классификация (ПК) и уточненное группирование (УГ). При ПК производится распределение объектов на заведомо непересекающиеся фасеточные классы. При УГ происходит распределение изготавливаемых деталей класса по производственным линиям (ПЛ), например, на основе минимизации времени их работы. Определение времени работы ПЛ производится методом имитационного моделирования с использованием сетей Петри. По результатам имитационного моделирования определяется: время изготовления объектов производства на указанных линиях, загрузка и время простоя оборудования внутри и т.п.

### Литература

1. **Норенков И.П.**, Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. **Цветков В.Д.** Система автоматизации проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1972.
3. **Митрофанов С.П.** и др. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. – М.: Машиностроение, 1981.

УДК 666.1.031.2:532.5

В.Я. ДЗЮЗЕР, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой ОАСП  
(УГТУ – УПИ)

## Численное моделирование теплообмена и гидродинамики расплава в стекловаренных печах

Удельная производительность и тепловая экономичность стекловаренных печей в значительной степени определяются конструкцией варочного бассейна. С использованием численной сопряженной (внешняя и внутренняя задача) модели печи исследовано влияние основных геометрических параметров ванны (рис. 1) на теплообмен и гидродинамику расплава. Принимали постоянными:  $L_B = 13,62$ ;  $h_1 = 1,3$ ;  $h_{пр} = 0,3$ ;  $b_n = 0,4$  м и переменными -  $\Delta h = (h_2 - h_1) = 0 \dots 1,2$ ;  $\Delta x/L_B = 0,06 \dots 0,295$ ;  $h_n = 0,2 \dots 1,1$  и  $x_n/L_B = 0,44 \dots 0,91$  м. Результаты моделирования представлены в виде полей температур стекломассы и относительных линий тока, нормированных к массовому расходу стекла через проток  $h_{пр}$  (3,47 кг/с).

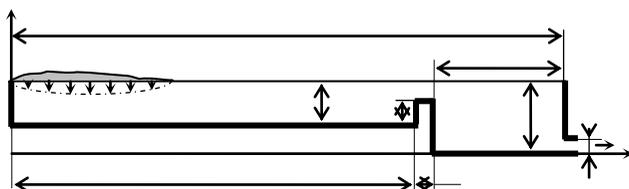


Рис. 1. Расчетная схема продольного сечения варочного бассейна

Установлены закономерности влияния  $\Delta h$ ,  $\Delta x/L_B$ ,  $x_n/L_B$  и  $h_n$  на температурное поле, структуру конвекционных потоков и кратность циркуляции стекломассы в различных частях бассейна, а так же ее термическую однородность на входе в проток. Получены аналитические зависимости, применение которых позволяет выполнить расчет конструкции варочного бассейна для высокопроизводительных стекловаренных печей [1, 2].

Результаты моделирования были использованы автором при проектировании новых и реконструкции действующих стеклотарных печей. Так, на печах № 1 и 2 ЗАО «Орехово-Зуевской стекольной компании» без применения дополнительного электроподогрева бассейна достигнут удельный съем стекломассы 2,54 т/(м<sup>2</sup>·сут.) при удельном расходе теплоты 4600 кДж/кг сваренной стекломассы. Реконструкция печи № 2 ГП «Кишиневский стекольный завод» позволила увеличить ее производительность с 140 до 202 т/сут. и снизить удельный расход теплоты с 8580 до 5028 кДж/кг.

### Литература

1. Дзюзер В.Я., Швыдкий В.С. Воздействие переливного порога на гидродинамику и теплообмен в варочном бассейне стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени // Стекло и керамика. – 2006. – № 7. – С. 6-12.
2. Дзюзер В.Я., Швыдкий В.С. Влияние конструкции варочного бассейна на теплообмен и гидродинамику расплава в стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени // Стекло и керамика. – 2006. – № 10. – С. 9-16.

## **Математические методы и модели оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения**

В условиях значительного износа большинства конструкций инженерных сооружений и оборудования водопроводных сетей городов Норильского региона и ограничения финансовых ресурсов на их реновацию проблема обеспечения надежности сетей обостряется по мере роста продолжительности эксплуатации.

Анализ технического состояния сетей водоснабжения г. Норильска показал, что при общей протяженности водопровода в 92,6 км, коммунальные системы жизнеобеспечения города находятся в плохом состоянии. На данный момент 70 % городских сетей водоснабжения г. Норильска требует капитального ремонта и замены. В связи с этим актуальной является задача выбора оптимальных математических методов и моделей для оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения.

Исследованию надежности трубопроводных систем посвящено в последнее время значительное количество работ, в которых для оценки надежности предлагается ряд критериев. В основном эти критерии сводятся к математической вероятности безотказной работы сети водоснабжения. В своих работах Абрамов Н.Н., Гальперин Е.М., Ильин Ю.А., Керимов Ф.Ю., Койда Н.У., Коломина Е.В., Красовский Б.М., Сомов М.А., Сумароков С.В., Украинец Н.А. этому критерию не всегда придают одинаковый смысл.

В основу современного расчета и анализа численных показателей надежности, сложных инженерно-технических систем положены математические методы и модели, а также современные компьютерные технологии, основанные на последних достижениях теории надежности, теории вероятности и возможностях вычислительной техники.

Для определения численных показателей вероятности безотказной работы сложных инженерно-технических систем, состоящих из однотипных элементов можно использовать систему « $k$  из  $n$ », как обладающую наиболее чувствительной функцией надежности. Теоретико-графовые модели являются формальными моделями реальных систем и позволяют исследовать коммуникационные сети.

Конечные марковские цепи, как стохастические модели, можно использовать в прогностических целях функционирования сети водоснабжения. Логико-вероятностный метод, используемый при построении «деревьев отказов» и его компьютерная реализация, является одним из оптимальных методов для вычисления вероятности безотказной работы сложной инженерно-технической системы.

УДК 621.365.5

В.А. ПРАХТ, ассистент, Ф.Н. САРАПУЛОВ, д.т.н., профессор  
(УГТУ–УПИ, г. Екатеринбург)

## Математическая модель установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок

Рассматривается задача построения математической модели, описывающей режимы работы установки индукционного нагрева движущихся цилиндрических заготовок (труб).

С учетом осевой симметрии, запишем уравнение, описывающее электромагнитные процессы

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} (A) \right) = -j + \sigma \frac{\partial}{\partial t} (A) + \sigma V \frac{\partial}{\partial x} (A) \quad (1)$$

здесь  $A$  – вектор магнитного потенциала,  $j$  – сторонняя плотность тока,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота питания источника тока,  $V$  – скорость движения заготовки,  $\sigma$  – электропроводность,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха,  $r, x$  – пространственные координаты,  $t$  – время.

При ферромагнитной нагрузке магнитная проницаемость  $\mu$  зависит от магнитной индукции  $B = \text{rot}A$  и температуры  $T$  заготовки

$$\mu(|B|, T) = 1 + (\mu_{20}(|B|) - 1) \cdot \left( 1 - \left( \frac{T}{T_k} \right)^2 \right) \quad (2)$$

где  $\mu_{20}(|B|)$  – табличное значение усредненного значения  $\mu$  при заданном  $|B|$  и температуре  $20^\circ C$ ,  $T_k$  – температура точки Кюри.

Уравнение, описывающее тепловые процессы при нагреве движущейся цилиндрической заготовки

$$c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q \quad (3)$$

здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\rho$  – плотность среды,  $T$  – температура,  $c$  – удельная теплоемкость (зависит от температуры и меняется в широких пределах, задается таблично),  $Q$  – объемная мощность тепловыделения, которая вычисляется следующим образом

$$Q = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \left( \delta \cdot \left| \frac{\partial A}{\partial t} \right|^2 \right) dt \quad (4)$$

Численное решение уравнения (1) получено на основе аппроксимации конечными разностями. Расчет температурного поля в зоне нагрева реализован с помощью метода контрольного объема.

О.Е. МАЛЬЦЕВА, инженер-конструктор  
(НПЦ «СтеклоГаз», г. Гусь-Хрустальный)  
Е.П. МИЛОСЕРДОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Эволюционно-функциональные модели процесса проектирования схем электроснабжения**

Существующие методики типового проектирования объектов энергетики и схем электроснабжения сложились в конкретных исторических условиях централизованного планирования и распределения ресурсов и в настоящее время не позволяют разрабатывать конкурентоспособные проекты, в полной мере удовлетворяющие требованиям заказчиков и потребителей. Современные технологии проектирования, получившие успешное развитие в передовых, быстро развивающихся отраслях техники, основаны на функциональном подходе к выбору вариантов структур и элементов технических объектов [1]. Однако, применение такого подхода к проектированию электроэнергетического оборудования и схем электроснабжения, должно учитывать, что все новые объекты предназначены для работы в сложной технической системе, определяющей совокупность требований организации взаимодействия с ранее установленными объектами и комплексами оборудования. Особенности проектирования, создания, эксплуатации и ремонта технических объектов, являющихся элементами сложных систем, прежде всего систем электроснабжения, представляется перспективным рассматривать в рамках концепции «техноценозов» [2].

Процесс проектирования технических объектов в этом случае организуется аналогично процессу возникновения нового вида в биоценозе, т.е. возникновение мутаций исходного вида, а также проверка и отбор видов в соответствии с условиями окружающей среды. В качестве алгоритмических моделей, позволяющих получить варианты новых конструкций технических объектов и осуществить выбор подходящих вариантов по совокупности требований, предлагается использовать методы морфологического анализа и синтеза и метод функционально-стоимостного анализа [1,3]. Алгоритм морфологического синтеза позволяет получить большое количество различных технических решений в рамках существующей конструктивно-функциональной структуры, а процесс функционально-стоимостного анализа позволяет отобрать удовлетворяющие требованиям и перспективные для разработки конструктивно-функциональные структуры.

### **Литература**

1. **Автоматизация** поискового конструирования / под ред. Половинкина А.И. – М.: «Радио и связь», 1981.
2. **Кудрин Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий / Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
3. **Громова Е.П., Милосердов Е.П.** Концепции разработки автоматизированных систем начальных стадий проектирования. В сб. Системы автоматизированного обучения и проектирования. – Иваново: ИвГУ- ИЗИ, 1989.

## Расчет параметров орбит минимально-достаточной спутниковой группировки

Спутниковая группировка, позволяющая обеспечить непрерывность наблюдения за любой точкой поверхности планеты, считается минимально-достаточной для многих задач аэрокосмической фотосъемки, систем связи и навигации. Условия полной видимости поверхности для мгновенных положений заданного количества спутников получены на основе модели перспективно-азимутального проецирования и приведены в [1].

Для проверки непрерывности наблюдения, положение каждого спутника в пространстве на круговой орбите в любой момент времени можно определить через два кватерниона: вектор положения спутника  $\mathbf{P}$  и кватернион орбиты  $\mathbf{J}$ . Действительную компоненту кватерниона орбиты определим как косинус половины дугового угла шарового сегмента, доступного для наблюдения с орбиты, а нормальный вектор плоскости орбиты определит мнимые компоненты. Поскольку мнимые части этих кватернионов в любой момент времени есть взаимно перпендикулярные векторы, скалярное произведение их равно 0, что позволяет однозначно рассчитать компоненты вектора  $\mathbf{P}$  как функции времени и компонент кватерниона орбиты  $\mathbf{J}$ . В частном случае, когда радиусы орбит всех спутников группировки одинаковы, можно предложить алгоритм проверки непрерывности наблюдения для заданного набора параметров спутниковой группировки в следующем виде:

- Расчет дуговых углов между спутниками в фиксированном мгновенном положении. Определение дугового треугольника с минимальной суммой длин дуг.
- Построение последовательности треугольников (по возрастанию суммы длин дуг), проверка на замкнутость сети. Сравнение с максимально допустимой длиной дуги.
- Повторение проверки с заданным шагом времени в течение периода, рассчитанного по радиусу орбит спутников.

### Литература

1. Милосердов Е.П. Некоторые свойства совокупностей перспективно-азимутальных изображений поверхности сферы // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «10 Бенардосовские чтения». – Иваново, 2001. – Т. 2. – С.56.

## Элементы реализации ЕЯ-интерфейсов к БД

Основной цикл работы ЕЯ-интерфейса показан на рис. 1. Эта схема показывает цикл обработки ЕЯ-запроса.

ЕЯ-запрос от пользователя поступает на вход процесса «Анализ ЕЯ». Этот процесс, используя лексическую информацию, хранящуюся в словарях, а также МПО выбранного ЕЯ-интерфейса, преобразует ЕЯ-запрос в семантическую сеть S. Затем в процессе «Генерация SQL» S-сеть преобразуется в SQL-форму.

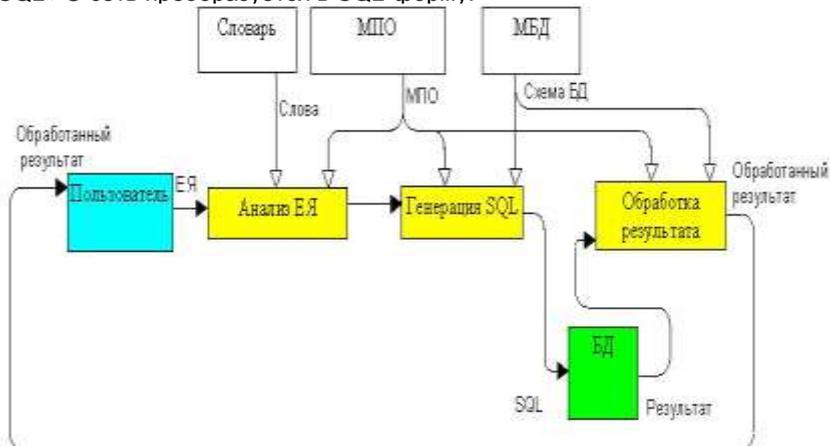


Рис. 1. Основной цикл работы ЕЯ-интерфейса

Полученный SQL-запрос поступает к целевой базе данных (БД), являющейся внешней системой по отношению к данной схеме, от нее получается результат в виде множества наборов записей, и, возможно, код ошибки. Процесс «Обработка результата» преобразует этот необработанный результат в вид, пригодный для представления пользователю. Опциональным элементом в данной схеме является процесс генерации SQL запроса на базе семантической сети.

Благодаря использованию семантически-ориентированного подхода ЕЯ-интерфейсы при правильном их построении обладают достаточно большой надежностью. Понимаются запросы, правильные с точки зрения синтаксиса, а также заданные в «телеграфном» стиле, более характерном для поисковых систем. Предполагается, что механизм разрешения неоднозначности позволит свести к минимуму обращение к пользователю и разрешать неоднозначность в системе анализа.

## **Вопросы создания интеллектуального интерфейса с организацией обработки запросов на естественном языке**

Диалог может рассматриваться как оболочка, включающая все процессы, входящие в систему, по выполнению определенных знаний.

Разработка интеллектуального интерфейса (ИИИ) направлена на повышение согласования стиля диалога с потребностями и представлениями человека. Отделение процессов диалога от процессов выполнения задания позволяет использовать один и тот же процесс для выполнения различных заданий пользователя путем включения его в разные процессы диалога.

Диалог, управляемый системой, более удобен тем, что он лучше подстраивается под пользователя, но при этом имеет больше ограничений, чем диалог, управляемый пользователем. Сообщения на ограниченном естественном языке (ЕЯ) наиболее часто используются для построения диалогов, управляемых системой.

Цель использования ЕЯ – естественное, наиболее удобное для пользователя ведение диалога с системой. Сложность методов анализа и синтеза ЕЯ зависит не только от языка общения, но и от языка, используемого для представления знаний. На начальном этапе диалога язык общения может быть несколько более жестко формализован определенным набором запросов системы и множеством различных ответов пользователя.

ИИИ – это комплекс интеллектуальных программных средств, обеспечивающих взаимодействие пользователя с системой. Сложность решаемых задач в процессе общения пользователя с ИИИ, приводит к необходимости выделения в структуре ИИИ диалоговой компоненты. Функции диалоговой компоненты способствуют осуществлению анализа (семантического, синтаксического) ЕЯ. Назначение диалоговой компоненты заключается в приемлемой организации обоюдного диалога «пользователь – ИИИ», в обозначении функций участников общения в ходе совместного решения задачи.

Применение ЕЯ, понимаемого любым пользователем, при решении ряда задач приложением с использованием ИИИ, является достаточно эффективным средством с точки зрения простоты работы.

### **Литература**

1. **Мальковский М.Г.** Диалог с системой искусственного интеллекта. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 214 с.

## **Основные проблемы обработки естественного языка**

Обеспечение взаимодействия с ЭВМ на естественном языке (ЕЯ) является важнейшей задачей исследований по искусственному интеллекту (ИИ). В то время как многие фундаментальные проблемы в области обработки ЕЯ (Natural Language Processing, NLP) еще не решены, прикладные системы могут оснащаться интерфейсом, понимающим ЕЯ при определенных ограничениях.

Обработка естественного языка – это формулирование и исследование эффективных механизмов для обеспечения коммуникации с ЭВМ на ЕЯ.

Задача исследований – создание эффективных моделей коммуникации на ЕЯ. Различаются общая и прикладная NLP. Общая NLP требует огромных знаний о реальном мире, и большая часть работ сосредоточена на представлении таких знаний и их применении при распознавании поступающего сообщения на ЕЯ. Существующие системы можно называть лишь экспериментальными, поскольку они работают с ограниченным количеством тщательно отобранных шаблонов на ЕЯ.

Прикладная NLP занимается возможностью коммуникации человека с ЭВМ на ЕЯ.

Основной проблемой NLP является языковая неоднозначность. Существуют разные виды неоднозначности: синтаксическая (структурная) неоднозначность; смысловая неоднозначность; падежная неоднозначность; референциальная неоднозначность; литерация.

Эта проблема решается с помощью перевода внешнего представления на ЕЯ во внутреннюю структуру. Для общей NLP такое превращение требует набора знаний о реальном мире. Прикладные системы NLP работают в узких предметных областях.

Под технологией анализа ЕЯ подразумевается перевод некоторого выражения на ЕЯ во внутреннее представление. Фактически все системы анализа ЕЯ могут быть распределены на следующие категории: подбор шаблона, синтаксический анализ, семантические грамматики, анализ с помощью падежных фреймов и т.д.

Наряду с проблемой распознавания текста существует проблема поддержания интерактивного диалога.

Таким образом, процесс разработки систем, обеспечивающих понимание ЕЯ, требует создание механизмов, отличных от традиционных способов представлений ЕЯ, а системы с естественно-языковыми интерфейсами применяются только в узких предметных областях.

## Спецификации семантических сетей

Известно, что знание – это целостная и систематизированная совокупность научных понятий о закономерностях природы, общества и мышления. Знание при хранении в памяти ЭВМ имеет разные модели представления: логические; сетевые; продукционные; фреймовые. Кроме того, с точки зрения применения ЭВМ знания обладают рядом особенностей: внутренняя интерпретируемость; структурированность; связность; семантическая метрика; активность.

Сетевые модели формально можно задать в виде  $H = (I; C_1, C_2, \dots, C_n)$ , где  $I$  – множество информационных единиц;  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – множество типов связей между информационными единицами. В зависимости от типов связей, используемых в модели, различают классифицирующие сети, функциональные сети, сценарии. В классифицирующих сетях используются отношения структуризации. Такие сети позволяют в базах знаний вводить разные иерархические отношения между информационными единицами. Функциональные сети характеризуются наличием функциональных отношений. В сценариях используются каузальные отношения, а также отношения типов «средство – результат», «орудие – действие» и т.п. Если в сетевой модели допускаются связи различного типа, то такую сетевую модель обычно называют семантической сетью.

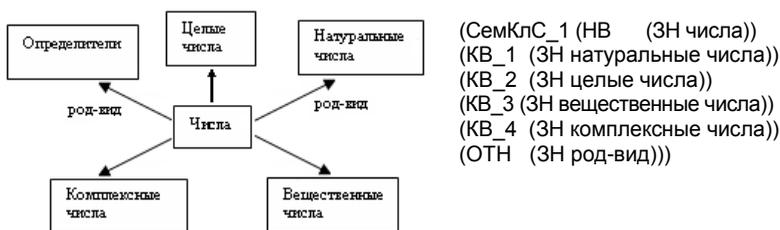


Рис.1. Классификация видов чисел

На рис. 1 приведен пример классификационной семантической сети. Как видно, описание семантических сетей в виде списков гораздо компактнее. Семантические функциональные сети аналогичны по структуре классификационным сетям.

Таким образом, предлагаются спецификации семантических сетей для возможности их использования в системах искусственного интеллекта, занимающихся решением задач, сформулированных на естественном языке.

## **Приобретение знаний в интеллектуальных программных системах**

Процесс приобретения знаний зависит от способа представления знаний, от предметной области, от способов обучения и самообучения системы приобретения знаний (СПЗ).

Способы обучения человека: лекции; практические занятия (решение легких заданий для закрепления теоретических положений и формирования необходимых навыков и умений; решение средних заданий с целью установления дополнительных связей между знаниями и развития более разнообразных способов навыков разбора и решения; решение трудных заданий для окончательного формирования навыков решения заданий по заданной теме); семинары (более подробный разбор теории; решение под руководством преподавателя задач; подробный разбор результатов решения для лучшего усвоения); написание рефератов, курсовых работ, разработка дипломов; дача зачетов, экзаменов, защита курсовых и дипломов. Соответствующие способы обучения программной системы: ввод структурированной информации, представляющей собой некоторое знание (структуризация информации представляет собой довольно серьезную проблему, если речь идет о больших объемах информации); решение простого и среднего задания под чьим-то руководством; решение сложного задания самостоятельно (должны формироваться механизмы решения, которые представляют собой связи активных знаний); организация диалога, при котором программная система задает вопросы о неясных местах (неясность у программной системы возникает тогда, когда частично отсутствует информация или отсутствуют некоторые связи); самостоятельное создание заданий по конкретной теме (скорее всего условие и цель в схематичной краткой форме или что-то одно системе необходимо определить).

Способы самообучения человека следующие: самостоятельное изучение литературы; разбор примеров. Соответствующие способы самообучения программной системы таковы: самостоятельный анализ базы знаний с целью выявления пробелов; ввод решенных задач для самообучения (для любой модели предполагается наличие следующих знаний: понятия; определения; функциональные знания; каузальные знания; классификационные знания)

Сопоставление способов обучения и самообучения показывает, что одинаковым формам приобретения знаний соответствуют нечетко похожие действия человека и интеллектуальных систем.

## **Создание семантической сети определений, используя семантическую сеть задачи первого уровня**

При анализе текста на естественном языке осуществляются морфологический и синтаксический виды анализа. Для получения семантической сети определений (СемСО) семантическая сеть задачи первого уровня (СемСЗ1) обрабатывается следующим образом. До тех пор пока не исчерпаны списки нулевого уровня СемСЗ1 в каждом очередном выделяемом списке нулевого уровня последовательно рассматривается, начальная и конечная вершина этого списка. В СемСО не попадают понятия из СемСЗ1, которые находятся в справочниках целевых слов и системных понятий. Эти справочники используются для разметки вершин СемСО путем введения дополнительных описательных списков, например, подсписок синоним (СИН), комментариев (КОМ) и т.д. Если в СемСО отсутствует понятие, выделенное в СемСЗ1, то пользователь выбирает режим ввода (с клавиатуры, из файла или речевой) и вводит данное понятие.

Начиная с первого списка нулевого уровня в СемСО, пока не исчерпаны все списки, в каждом очередном выделяемом списке нулевого уровня последовательно рассматриваются понятия низкого уровня в начальной и конечной вершине данного списка. В случае отсутствия в СемСО понятия низкого уровня оно вводится.

При вводе понятия низкого уровня используются справочник целевых слов, справочник системных понятий в качестве фильтров понятий, а также для добавления в СемСО ассоциированных понятий. В справочнике целевых слов накапливаются определения целей соответствующих данной предметной области. Хотя не исключено, что они могут быть использованы в других предметных областях. Следовательно, целевые слова относятся к инвариантному подмножеству понятий. Справочник системных понятий включает в себя определения, относящиеся к разрабатываемой системе интеллектуального интерфейса.

При выборе режима ввода понятий пользователем ввод производится с выбранного им устройства.

Семантические сети, используемые в интеллектуальном интерфейсе, должны обладать следующими свойствами: хранение такого объема знаний, которое необходимо для организации интеллектуального интерфейса; возможность динамического наращивания сетей; однотипная организация семантических сетей; возможность быстрой обработки семантических сетей.

### **Литература**

1. **Справочник.** Искусственный интеллект. Книга 2. Модели и методы / Под ред. проф. Поспелова Д.А. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

## **Интервальные ограничения в параметрическом моделировании САПР**

Сущность параметрического моделирования состоит в создании математической модели класса конструктивно однородных изделий, а затем в генерации изображений этих изделий по набору задаваемых размерных параметров. Параметрическая модель состоит из объектов и ограничений, описывающих отношения между ними. Поддерживаются следующие отношения: геометрические ограничения (перпендикулярность, компланарность, касательность, соосность, симметрия), меры (угол, расстояние, радиус, а также соотношения между ними), инженерные ограничения (уравнения, связывающие инженерные параметры объектов и выражающие физические и экономические условия, а также черные ящики, таблицы и неравенства).

Таким образом, параметрическое моделирование заключается в том, что конструктор определяет форму заданием ограничений и генерирует ее путем удовлетворения ограничений. Все модификации одного или нескольких элементов модели автоматически распространяются через взаимосвязанные ограничения, обеспечивая, таким образом, постоянное соответствие новых версий модели первоначальному замыслу проектировщика. Форма в параметрическом моделировании изменяется не непосредственно, а через использование геометрических ограничений и размерных соотношений. Поэтому конструктор может разработать множество альтернативных проектов, не заботясь о деталях, а сосредоточившись на функциональных аспектах.

Доступные в настоящее время системы САПР требуют задания фиксированных значений для параметров модели, как например, позиция точки в 3D-пространстве, направление линии, или расстояние между двумя осями. Фиксация значений параметров вызывает несколько проблем. Во-первых, она неявным образом добавляет жесткие ограничения на геометрию, которые потенциально могут приводить к конфликтам на последующих этапах проектирования. Во-вторых, требование фиксации значений параметров делает трудной разработку инструментальных средств концептуального проектирования, когда фактические значения параметров могут быть не известны и/или не важны. В-третьих, информация о допустимом диапазоне для параметров не может быть правильно представлена и встроена в существующие САПР, что существенно для процесса оптимизации проекта.

Между тем, задание значения каждого параметра модели интервалом, вместо простого назначения одного вещественного значения позво-

ляет решить эти проблемы. Так как параметр может принимать любое допустимое значение между нижней и верхней границами интервала, то степень свободы геометрических сущностей возрастает. Она будет ограничиваться постепенно в процессе проектирования, что снижает шанс возникновения конфликта. Определение параметра как диапазона, не требует устанавливать все значения параметров, это увеличивает гибкость геометрической формы, и неточность проекта становится моделируемой. При интервальном представлении, свойственная диапазону информация непосредственно представляет концептуальные границы допустимости, таким образом, интегрируя эскизное проектирование и оптимизацию проекта.

Еще одним важным свойством, отличающим этот подход от имеющих схем параметрического моделирования, является то, что он позволяет решать недоопределенные задачи и диагностировать переопределенность модели.

В докладе рассмотрена схема параметрического моделирования, основанная на использовании интервалов для представления проектной неопределенности и неточности. Дается определение интервальных чисел и основных операций над ними. Описываются методы решения интервальных ограничений. Предлагаются методы построения и работы с покрытиями, которые позволяют получить более точные области значений параметров. Представлена архитектура математического решателя созданного на основе описанного подхода. Приводится пример использования данного решателя для проектирования элементов воздушной линии электропередачи.

#### Литература

1. **Карпов М.А.**, Кокин В.М. Применение интервальных математических моделей в системах моделирования инженерных сетей // Тез. докл. 12 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» / МЭИ. – Москва, 2005.
2. **Карпов М.А.**, Кокин В.М. Моделирование инженерных сетей как задача в ограничениях // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения) / ИГЭУ. – Иваново, 2005.

## Интервальный анализ коллизий при проектировании воздушных линий электропередач

Одной из задач проектирования воздушной линии электропередач (ВЛ) является проверка коллизий внутри ВЛ, с другими ВЛ, с другими инженерными сетями и сооружениями. Основой этого анализа является задача нахождения точки пересечения двух кривых в пространстве.

Для получения кривой провисания провода принимаются следующие основные предположения: провод в пролете представляется как гибкая упругая нить; гирлянда изоляторов принимается жесткой, а ее вес приложен к центру гирлянды; сосредоточенные нагрузки направлены вертикально. С учетом этого кривая провисания провода на любом участке пролета в системе координат  $x, y$  будет описываться уравнением

$$y = \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{ch} \left( \frac{\gamma}{\sigma} (x - x_0) \right) + y_0 \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение в проводе;  $\gamma$  – удельная нагрузка на провод;  $x_0, y_0$  – параметры кривой провисания, определяемые взаимным расположением точек границ участков и началом отсчета координат.

В силу неточности представления кривых из-за аппроксимации, эта задача сводится к определению области пересечения двух пространственных трубок  $T_1(y_1, \varepsilon_1)$ ,  $T_2(y_2, \varepsilon_2)$  заданных соответственно своими радиусами  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и осевыми кривыми провисания проводов. Параметры кривой задаются интервалами, определяемыми точками подвеса провода и расчетными режимами.

Если ввести трубки  $T_i(y_i, \varepsilon_0)$ ,  $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ , то поставленная задача эквивалентна задаче определения точки пересечения одной трубки с осевой линией другой трубки. Предлагается метод уточнения области пересечения, основанный на покрытии трубки шарами радиусом много большим чем ее собственный радиус, с последующим уточнением области пересечения путем покрытия куска осевой линии шарами меньшего радиуса и так до достижения требуемой точности. Метод основан на решении интервальных нелинейных уравнений.

Как показали результаты расчетов, скорость решения задачи пересечения трубок зависит от типа системы и взаимного расположения трубок, однако она всегда решается за вполне удовлетворительное время. Предложенный метод сводит задачу к решению одного уравнения, а точнее к определению имеет ли уравнение корни. С помощью предложенного алгоритма, очень быстро определяется случай, когда решений нет, т.е. трубки не пересекаются.

## Об особенностях расчета процессов коррозии бетона

Повышение качества и долговечности сооружений является одной из важнейших задач строительства. Решение этой задачи требует знания сущности процессов, протекающих при эксплуатации строительных конструкций, в первую очередь существующих процессов коррозии.

В общем случае для коррозии диффузия гидроксида кальция в пористой структуре бетона описывается нелинейным дифференциальным уравнением массопроводности параболического типа:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \delta > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta,$$

где  $C(x, \tau)$  – концентрация свободного СаО в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , кг СаО/кг бетона;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м;  $k$  – коэффициент диффузии, м/с<sup>2</sup>.

Методом интегральных преобразований Лапласа авторами были получены выражения, представленные в форме рядов Фурье.

1. Профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Bi_m}{1 + K_m} - 2 \cdot Bi_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \cdot \bar{x}) \cdot \exp(-\mu_n \cdot Fo_m)}{\mu_n \cdot [1 - K_m + Bi_m] \cdot \sin \mu_n + [\mu_n^2 - K_m] \cdot \cos \mu_n}$$

2. Средняя по толщине конструкции концентрация переносимого компонента в момент времени  $\tau$ , определяемый значением  $Fo_m$ :

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Bi_m}{1 + K_m} - 2 \cdot Bi_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \cdot \bar{x}) \cdot \exp(-\mu_n \cdot Fo_m)}{\mu_n \cdot [1 - K_m + Bi_m] \cdot \sin \mu_n + [\mu_n^2 - K_m] \cdot \cos \mu_n}$$

3. Концентрация переносимого компонента в жидкой фазе:

$$Z_{\text{ж}}(Fo_m) = 1 + 2 \cdot Bi_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n \cdot [1 - \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m)]}{[\mu_n \cdot (1 + Bi_m - K_m) \cdot \sin \mu_n + (\mu_n^2 - K_m) \cdot \cos \mu_n]}$$

Здесь  $Bi_m$  – массообменный критерий Био;  $K_m = m \cdot G_{\text{бет}} / G_{\text{ж}}$  ( $G_{\text{бет}}$  и  $G_{\text{ж}}$  – масса бетона и масса жидкости, кг;  $m$  – константа Генри);  $\mu_n$  –

корни характеристического уравнения  $\text{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n^2 - K_m}{\mu_n \cdot Bi_m}$ .

Приведенные выражения позволяют не только определить концентрацию свободного СаО в твердой и жидкой фазах, но и спрогнозировать динамику и кинетику исследуемых процессов.

## **Некоторые вопросы адекватности математических моделей**

Важнейшим требованием к математической модели является требование ее адекватности изучаемому реальному объекту относительно выбранной системы его характеристик. Любая математическая модель представляет изучаемый объект лишь в некоторых его свойствах, при этом изучение отдельных свойств моделируемой системы осуществляется ценой отказа от исследования других ее свойств. Многие свойства, которые остаются неучтенными при моделировании, например, из-за того, что они неизвестны, могут в корне изменить картину результатов моделирования, и модель, таким образом, оказывается очень далека от оригинала. Достоверность знания, полученного с помощью моделирования, тем выше, чем полнее аналогия прототипа и модели, поэтому возможности этого метода необходимо рассматривать в связи с тем, какой критерий подобия использовался при создании модели и каким образом она получена. Такой принцип анализа возможностей моделирования особенно необходим тогда, когда прототип и модель являются объектами различной природы.

Наиболее плодотворные результаты по использованию моделей можно получить только в областях с хорошо развитой теоретической структурой. Например, системный подход исходит из признания необходимости изучения объектов как некоторых целостных образований, в которых составляющие их элементы достаточно четко разделены, при этом поведение любого элемента системы влияет на поведение других ее элементов. С его позиций объект исследования рассматривается как сложное образование, специфика которого определяется элементами его структуры и характером отношений и связей между элементами. Данный подход предполагает исследование отдельных сторон объекта не изолированно друг от друга, а в их совокупности, взаимозависимости и взаимобусловленности.

Следует всегда иметь в виду одно важное обстоятельство: принятое математическое описание предопределяет весь круг вопросов, которые можно исследовать в его рамках. В связи с этим не может существовать какой-то единственной модели исследуемого объекта. Существует множество моделей, каждая из которых обладает характерными математическими свойствами, определяемыми используемым аппаратом формализации, и каждая из которых допускает изучение только определенного класса вопросов, связанных со структурой и функционированием моделируемой системы.

## Некоторые нестандартные методы вычисления различных интегралов

В данной работе предлагаются некоторые нестандартные методы вычисления интегралов, которые не рассматриваются в традиционном курсе высшей математики. Однако данные методы вычисления интегралов необходимо использовать, так как их применение позволяет вычислять интегралы, встречающиеся при решении многих прикладных задач.

Рассматривается равенство 
$$\int_0^{\pi} x f(\sin x) dx = \frac{\pi}{2} \int_0^{\pi} f(\sin x) dx,$$

где  $f(x)$  – функция непрерывная на отрезке  $[0;1]$ , и доказывается его справедливость.

Согласно этому равенству вычисляется интеграл  $\int_0^{\pi} x \sin^n x dx$ , и

рассматривается два случая: для четного и нечетного показателя  $n$ .

Обобщая полученные данные, записывается окончательный результат:

$$\int_0^{\pi} x \sin^n x dx = \begin{cases} \pi \cdot \frac{(2k)!!}{(2k+1)!!}, & \text{если } n = 2k \\ \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & \text{если } n = 2k+1 \end{cases}$$

### Литература

1. **Фихтенгольц Г.М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления, т.т.1-3. – Москва, 1970.
2. **Джексон.** Ряды Фурье. – Москва, 1960.
3. **Харди Г.** Расходящиеся ряды. – М.: Наука, 1979.
4. **Евграфов М.А.** Аналитические функции. – М.: Наука, 1968.

## Моделирование прохождения сигнала сложной формы в оптикоэлектронных системах

При определении реакции линейной оптикоэлектронной системы на трапецидальный импульс решение задачи разбивается на четыре этапа, которые соответствуют четырем участкам входного импульсного воздействия (рис. 1). Упрощенные схемы замещения, используемые при расчетах, позволяют сравнить полученное численное решение с точным решением, рассчитанным с помощью интеграла Дюамеля.

При решении задачи классическим методом с помощью интеграла Дюамеля общее решение довольно громоздко и представляется в виде суммы интегралов. При решении операторно-дискретным методом (ОДМ) расчет, кроме первых значений функции, описывается в программе циклом, состоящим только из одной формулы:

$$U_{\text{Вых}}^{\text{числ}}[i] = A_0 U_{\text{Вх}}[i] - B_1 U_{\text{Вых}}[i-1] - B_2 U_{\text{Вых}}[i-2].$$

Как видно из графиков, решение, полученное ОДМ, полностью совпадает с точным решением, а трудоемкость расчетов, выполняемых численным и классическим методом существенно различна.

Исследование погрешностей моделирования позволило выявить прямо пропорциональную зависимость между периодом дискретизации  $T$  и абсолютной погрешностью моделирования  $\Delta$ . Следовательно, изменяя шаг дискретизации можно управлять или даже задавать точность моделирования.

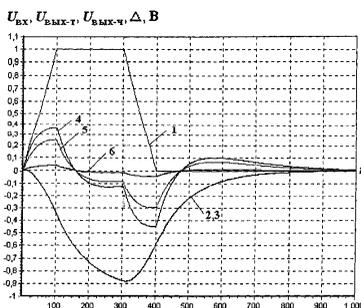


Рис.1. Реакция системы на трапецидальный импульс:

- 1 — входное воздействие;
- 2 — точное решение, полученное методом интеграла Дюамеля,
- 3 — решение, полученное численным (ОДМ) методом,
- 4, 5, 6 — зависимости абсолютных погрешностей моделирования от шага дискретизации ( $\Delta$ ):
- 4 — для  $T = \tau/100$ ;
- 5 — для  $T = \tau/150$ ;
- 6 — для  $T = \tau/1000$

### Литература

1. Шилин А.Н. Операторно-дискретный метод анализа электрических цепей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2000. — №7. — С.50-56.
2. Шилин А.Н., Зенина Е.Г. Расчет формы выходного сигнала усилителя фототока // Автоматизация технологических процессов в машиностроении: Сб. Часть 1. — Волгоград: ВолгГТУ, 1997. — С.135-139.

## О совместном распределении случайных величин с наибольшей энтропией

**Теорема 1.** Пусть  $X_1, \dots, X_n$  - дискретные случайные величины, имеющие конечное число значений, и заданы распределения этих случайных величин. Тогда, если совместное распределение случайных величин  $X_1, \dots, X_n$  имеет наибольшую энтропию, то случайные величины  $X_1, \dots, X_n$  являются независимыми.

Доказательство этой теоремы легко получить с помощью *следствия 2.10* и *следствия 2.12* из [1]. Можно доказать теорему 1 иначе, составив и решив задачу на условный экстремум. Оказывается, что решение этой задачи таково, что для всех значений  $j_1, \dots, j_n$  справедливо равенство  $P(X_1 = j_1, \dots, X_n = j_n) = P(X_1 = j_1) \cdot \dots \cdot P(X_n = j_n)$ . Последнее означает, что случайные величины  $X_1, \dots, X_n$  являются независимыми. Аналогично доказывается следующая теорема.

**Теорема 2.** Пусть  $X_1, \dots, X_n$  - дискретные случайные величины, имеющие конечное число значений, и заданы совместные распределения случайных величин  $X_k$  и  $X_{k+1}$ ,  $k=1, \dots, n-1$ . Тогда, если совместное распределение случайных величин  $X_1, \dots, X_n$  имеет наибольшую энтропию, то случайные величины  $X_1, \dots, X_n$  образуют цепь Маркова.

Если составить и решить задачу на условный экстремум, соответствующую условию теоремы 2, то получим, что для всех значений  $j_1, \dots, j_n$  случайных величин  $X_1, \dots, X_n$  справедливо равенство  $P(X_1 = j_1, \dots, X_n = j_n) = P(X_1 = j_1) \cdot P(X_2 = j_2 | X_1 = j_1) \cdot \dots \cdot P(X_n = j_n | X_{n-1} = j_{n-1})$ . Именно по таким формулам вычисляются вероятности совместного распределения случайных величин  $X_1, \dots, X_n$ , образующих цепь Маркова.

### Литература

1. **Мартин Н.Ф.**, Ингленд Д.У. Математическая теория энтропии. – М.: Мир, 1988.

## СЕКЦИЯ 3. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 681.3:621.18:62.57

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

### Проблемы и направления развития технологии АСУТП электростанций

Современные АСУТП на базе ПТК сетевой организации позволяют существенно повысить уровень автоматизации энергоблоков. Однако в настоящее время используются далеко не все потенциальные возможности ПТК как нового класса технических средств автоматизации.

Среди наиболее актуальных проблем АСУТП ключевой представляется несовершенство технологии создания новых систем на базе ПТК сетевой организации. Именно на решение этой проблемы нацелены основные исследования, выполняемые в последние годы на кафедре систем управления ИГЭУ (рис.1). При этом среди всего спектра выполняемых исследований особое внимание уделяется реализации наиболее сложных (интеллектуальных, наукоемких) функциональных задач АСУТП, в том числе, оптимизации автоматического управления режимами работы энергоблоков (автоматическое управление пуском/остановом оборудования, сложные технологические блокировки), диагностированию (прогнозу) состояния технологического оборудования, контролю качества автоматического регулирования и др.



Рис.1. Основные направления совершенствования технологии создания АСУТП тепловых электростанций

С.А. ТАЛАМАНОВ, д.т.н., доцент,  
Н.А. АГАФОНОВА, к.т.н., доцент, докторант, Ю.В. НАУМОВ, студент  
(ИГЭУ)

## **Направления развития и применения станции контроля качества автоматического регулирования и автоматизации настройки АСР**

Современное состояние развития АСУТП тепловых электростанций (ТЭС) характеризуется переходом к практической реализации наиболее сложных (интеллектуальных) функций, к которым следует отнести контроль показателей качества автоматического регулирования (АР), идентификацию технологических объектов управления (ТОУ) и автоматизацию настройки автоматических систем регулирования (АСР). Возможность практической реализации рассматриваемых новых функций АСУТП обусловлена в первую очередь наличием трендов необходимых сигналов, регистрируемых на архивной станции в составе ПТК АСУТП с достаточно малым шагом по времени. Исходя из данной возможности была выполнена разработка станции контроля качества АР и автоматизации настройки АСР, предназначенной для решения рассматриваемых задач по отдельным локальным АСР в составе АСУТП энергоблоков ТЭС [1].

Вместе с тем наличие архива трендов сигналов по энергоблоку в целом позволяет существенно расширить класс решаемых задач. В докладе рассматриваются теоретические (алгоритмические) и практические аспекты расширения функциональных возможностей станции контроля качества АСР и автоматизации настройки АСР, в составе которой выделены следующие подсистемы:

- подсистема контроля качества АР (оценка показателей качества при штатной работе АСР, т.е. функциональное диагностирование АСР; оценка показателей качества АР при испытаниях АСР, т.е. тестовое диагностирование АСР; контроль качества работы исполнительных устройств в составе АСР);
- подсистема идентификации (оценка статических характеристик ТОУ; оценка динамических характеристик ТОУ; построение моделей возмущений, в т.ч. статистический корреляционно-спектральный анализ и вейвлетт-анализ случайных процессов; построение моделей ТОУ и систем, в т.ч. оценка адекватности моделей);
- подсистема параметрического синтеза локальных АСР (расчет одноконтурных и двухконтурных АСР, в т.ч. параметрический синтез робастных систем).

### **Литература**

1. **Таламанов С.А.** Концепция построения станции контроля качества автоматического регулирования и автоматизации настройки АСР в составе АСУТП тепловых электростанций // Сб. докл. Всерос. науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2006). – С.-Петербург, 2006. – С.196-201.

## **Особенности аналитической экспертизы технических решений по АСУТП новых энергоблоков тепловых электростанций**

Современный этап развития тепловой энергетики характеризуется существенно возросшим объемом строительства и ввода в действие новых электростанций (Северо-Западная ТЭЦ, Калининградская ТЭЦ-2, Сочинская ТЭС, Ивановские ПГУ и др.). В части АСУТП ввод в действие и освоение в штатной эксплуатации новых энергоблоков сопряжены с дополнительными трудностями (по сравнению с модернизируемыми электростанциями). Основная причина дополнительных трудностей – отсутствие для новых энергоблоков отработанных алгоритмов по базовым функциям АСУТП, к которым относятся технологические защиты, блокировки, автоматические системы регулирования (АСР), технологическая сигнализация. При этом если для модернизируемых электростанций технология эксплуатации энергоблоков и соответствующие алгоритмы базовых функций АСУТП в достаточной степени отработаны, то для вновь строящихся ТЭС с головными энергоблоками процесс ввода в действие АСУТП совпадает по времени с режимной наладкой основного технологического оборудования. Как следствие, имеет место повышение издержек в ходе работ по вводу АСУТП в действие, что подтверждается опытом соответствующих пусковых комплексов (например, на блоке ПГУ-450, ст. №1 Северо-Западной ТЭЦ).

В докладе рассматривается методика аналитической экспертизы алгоритмов реализации базовых функций АСУТП новых энергоблоков ТЭС, нацеленная на своевременное выявление ошибок (неработоспособных технических решений) и способствующая снижению издержек при вводе систем управления в действие. Особое внимание уделяется опыту практического применения методики для экспертизы технических решений по АСУТП энергоблока ПГУ-450Т, ст. №1 Калининградской ТЭЦ-2.

Методика включает в себя этапы:

- анализ объема реализации базовых функций АСУТП на соответствие требованиям нормативно-технических документов;
- разработка интегрированных структурных схем технологических защит, блокировок, АВР, автоматических регуляторов и технологической сигнализации по отдельным функциональным зонам энергоблока;
- анализ работоспособности основных АСР энергоблока (подкрепляется результатами имитационного моделирования АСР);
- сопоставление ПО контроллеров ПТК АСУТП (алгоритмических схем) с требованиями по реализации базовых функций АСУТП (интегрированными структурными схемами технологических защит, блокировок, АСР и технологической сигнализации).

## **Система дистанционного обучения средствам проектирования функциональных задач АСУТП**

В настоящее время в энергетике России существенно возросли объемы и интенсивность работ по модернизации систем контроля и управления технологического оборудования электростанций и внедрению современных АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры. При этом ввод новых мощностей будет существенно увеличен, что потребует большое количество квалифицированных инженерных кадров. С учетом этого на энергетических предприятиях России (электростанции, проектные и научно-исследовательские институты, монтажные и наладочные организации и др.) возникла острая потребность в подготовке специалистов, владеющих новыми информационными технологиями управления оборудованием электростанций.

При этом успешная подготовка специалистов возможна только в ходе выполнения всего комплекса работ по созданию, проектированию и эксплуатации современных АСУТП на базе программно-технических комплексов. Однако, программный технический комплекс является дорогостоящим средством и лишь небольшое количество людей имеет к нему доступ на учебных полигонах.

В настоящее время в составе лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» кафедры систем управления ИГЭУ разрабатывается подсистема дистанционного обучения на базе САПР ПТК «Квинт».

Система дистанционного обучения (система удаленного доступа к средствам обучения и самостоятельной подготовки) даст возможность расширить доступ к изучению средств проектирования функциональных задач АСУТП на базе ПТК.

Основными задачами создания системы дистанционного обучения являются:

- разработка система удаленного доступа к средствам САПР ПТК «Квинт» для обучения и самостоятельной подготовки;
- реализация учебных образовательных программ и лабораторных практикумов в соответствии с учебными планами и программами подготовки специалистов по направлению «Автоматизация и управление» и в частности по специальности «Управление и информатика в технических системах».

Таким образом, в процессе обучения с помощью данной системы, обучаемый сможет наработать навык по разработке функциональных задач АСУТП и в дальнейшем при работе на реальном объекте избежать типовых ошибок.

## **Исследование динамических свойств ПТК АСУТП как нового класса средств автоматизации**

Современные АСУТП строятся на базе новых технических средств автоматизации – программно-технических комплексах (ПТК) сетевой организации. В состав ПТК входят: микропроцессорные контроллеры, компьютеры рабочих станций, сетевые средства. В настоящее время на отечественном рынке АСУТП представлено большое количество современных ПТК («КВИНТ», «КРУГ», «ТПТС», «ОВАЦИЯ», и др.) как российского, так и зарубежного производства.

Ключевую роль в реализации управляющих функций играет алгоритмическое обеспечение контроллеров, разностные уравнения которые в документации не раскрываются и составляют ноу-хау («know how») фирмы-поставщика ПТК. Однако известно, что закон функционирования реального регулятора, как правило, отличается от заданного и неучет этих различий может привести к ухудшению качества регулирования или даже к неустойчивости всей системы.

Работа включала выполнение следующих этапов.

### 1. Исследование динамических свойств ПТК АСУТП:

- выделены и классифицированы факторы, связанные с функционированием ПТК в составе АСУТП, а также показано их влияние на заложенные в контроллер динамические законы преобразования сигнала;
- выделены группы системных факторов, которые влияют на качество эксплуатации АСУТП;
- определены области нормальной работы ПТК и получены реальные частотные характеристики алгоритмов регулирования при различных значениях факторов.

### 2. Разработка методических рекомендаций по наладке и эксплуатации:

- рекомендации по проектированию АСУТП: оценка применимости контроллеров ПТК для решения конкретных задач автоматического регулирования; рекомендации по выбору технической структуры и проектной компоновке ПТК в составе АСУТП;
- рекомендации по наладке алгоритмов и прикладного программного обеспечения контроллеров ПТК в составе АСУТП;
- рекомендации по наладке и эксплуатации систем автоматического регулирования с учетом исследуемых факторов.

Исследование динамических свойств ПТК АСУТП как нового класса средств автоматизации, определение границ их области нормальной работы и разработка рекомендаций по наладке и эксплуатации сложных систем автоматического регулирования в составе современных АСУТП являются своевременными и актуальными задачами.

## **Особенности моделирования технологических объектов управления в расчетной станции «МЕЗОН»**

Имитационные модели технологических объектов находят все большее применение, как при создании тренажеров оперативного персонала, так и в целях проверки и отладки алгоритмов управления сложным оборудованием. Важность и актуальность имитационного моделирования подтверждается стремлением производителей программно-технических комплексов (ПТК) для управления технологическими процессами предоставить средства для разработки имитационных моделей объектов управления.

Наиболее преуспевшим в этом направлении является отечественный ПТК «КВИНТ СИ» (производства ОАО «НИИТеплоприбор»), в состав которого включена расчетная станция «МЕЗОН». Расчетная станция «МЕЗОН» представляет собой новейшую среду имитационного моделирования с широким перечнем алгоблоков и встроенной библиотекой моделей регулирующих органов.

Главным преимуществом реализации имитационных моделей технологических объектов управления в расчетной станции «МЕЗОН» является отсутствие необходимости дальнейшей связи подсистемы модели и подсистемы управления. В этом случае и модель объекта и управляющая система реализуются и функционируют в единой информационной среде ПТК «КВИНТ СИ». При этом модель, реализованная в расчетной станции «МЕЗОН» незначительно уступает в точности модели, реализованной с помощью специализированных средств моделирования.

ПТК «КВИНТ СИ» позволяет проводить тестирование технологических программ и отладку алгоритмов управления в отсутствии «настоящего» контроллера. Для этой цели в расчетной станции «МЕЗОН» реализован «Виртуальный контроллер», в который через алгоблоки, имитирующие работу модулей УСО, загружается имитационная модель объекта управления. Разработка алгоритмических схем контроля и управления производится в системе технологического программирования «Пилон».

Среди особенностей моделирования технологических объектов управления в расчетной станции «МЕЗОН» можно выделить возможность расширения библиотеки алгоритмов за счет добавления новых, написанных на языке программирования С.NET, а также возможность запоминания и в последующем восстановления определенного состояния объекта моделирования.

## **Разработка моделей гидравлических систем с серийно-выпускаемыми регулирующими органами**

В тепловых схемах теплоэнергетического оборудования для регулирования различных сред используются изготавливаемые промышленностью регулирующие органы (РО). Регулирование основных параметров тепломеханического оборудования современной электрической станции осуществляется либо автоматическими системами, функционирующими в составе АСУТП, либо дистанционно. Поэтому все расчеты РО должны быть ориентированы, прежде всего, на обеспечение требуемого качества переходных процессов в системах автоматического регулирования.

Весомое значение на качество работы систем регулирования оказывают гидравлические характеристики трубопроводных линий, т.к. они могут привести к значительному отклонению формы расходных характеристик РО от заводских, в качестве которых выступают или конструктивные или пропускные характеристики.

Для определения расхода среды по известной аналитической зависимости [1] необходимо знать суммарные потери давления в гидравлической системе, включая РО, минимальный перепад давления на РО и относительную пропускную способность РО. Ввиду того, что на реальных теплоэнергетических объектах датчики измерения давления могут находиться на значительном расстоянии от РО, наибольшую сложность вызывает определение потери давления на участках от датчика давления до входного патрубка РО и от выходного патрубка РО до второго датчика давления.

Таким образом, для определения перепада давления на РО, при известной величине потери давления в системе, необходимо вычислить потери давления в линии, которые складываются из потерь давления в прямолинейных участках трубопровода, потерь давления в местных сопротивлениях и изменения давления, вызванного разностью высот начальной и конечной точек трубопровода.

В ходе проделанной работы найдены математические зависимости и произведен подбор материалов, содержащих необходимые данные по серийно выпускаемым РО. Объектом исследований был выбран энергоблок ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2. Результатом работы являются модели гидравлических систем с реальными РО, построенные в среде имитационного моделирования, позволяющие получать расходные характеристики РО в конкретных технологических условиях.

### **Литература**

1. **Благов Э.Е.** Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС / Э.Е. Благов, Б.Я. Ивницкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

## **Методика создания имитационных моделей регулирующих органов**

Все современные электрические станции оснащены большим количеством различной энергетической арматуры. Особое место среди всей арматуры занимает дроссельно-регулирующая арматура. Регулирующие органы (РО) на электростанциях являются исполнительными устройствами систем автоматического регулирования, и соответственно от их действия зависит стабильность режимов работы энергетического оборудования. Одним из путей, позволяющих произвести правильный расчет и выбор РО, является создание их математических моделей.

Нами разработана и опробована на практике методика создания имитационных моделей серийно выпускаемых РО.

Первый этап нашей методики включает в себя формирование списка моделируемой арматуры, определение границ моделирования и формирование перечня величин, входящих в имитационную модель.

На втором этапе производится подбор материалов, содержащих необходимые исходные данные по выбранным РО. Наиболее подходящими источниками информации мы считаем паспорта и технические описания РО, разработанные заводами-изготовителями.

Третий этап заключается в представлении всех необходимых величин в численной форме, соответствующей требованиям выбранной среды имитационного моделирования.

Четвертый этап представляет собой создание имитационных моделей РО в среде имитационного моделирования путем установки необходимых алгоритмических блоков, установки необходимых межблочных связей и задания корректных значений входных величин.

Пятый этап сводится к проведению испытаний имитационных моделей и верификации полученных величин.

Для апробирования разработанной методики были выбраны 38 регулирующих клапанов, серийно выпускаемых отечественной промышленностью и применяемыми на российских электростанциях, в частности, на Калининградской ТЭЦ-2.

Для реализации поставленной задачи исходные данные, содержащиеся в виде графиков (например, конструктивные и пропускные характеристики), были обработаны специализированной программой, которая по пиксельным сканированием преобразовала эти кривые в массивы точек. На основе аналитических зависимостей и наборов исходных данных нами созданы модели РО в среде имитационного моделирования VisSim. В дальнейшем мы планируем расширить имеющуюся библиотеку имитационных моделей и пополнить ее значительным количеством новых клапанов.

## **Оценка погрешности измерения влажности термоградиентным методом**

В реальном процессе сушки тонких коллоидных капиллярно-пористых материалов в современных скоростных сушильных машинах процесс сушки идет с большой скоростью и имеет место неравномерность распределения температуры и влажности по толщине материалов, что существенно увеличивает затраты на производство.

Современное текстильное производство столкнулось с проблемой неэкономного расходования энергетических ресурсов. Поэтому контроль и регулирование влажности длинномерных листовых материалов является актуальной задачей. Решение ее позволяет значительно сократить затраты на тепловую энергию в процессах сушки.

На кафедре Систем управления ИГЭУ разработан термоградиентный (ТГ) метод измерения влажности указанных материалов, основанный на измерении температур полотна в начале и конце процесса сушки.

Термоградиентный метод является косвенным гиротермическим методом измерения влажности, в котором практически исключается погрешность, связанная с изменением состава высушиваемого материала.

Для реализации метода необходимо знать зависимость относительной влажности у поверхности материала от влагосодержания этого материала. Наиболее благоприятный для измерений участок находится в диапазоне 20–80 %, где имеет место максимальная крутизна и линейность характеристики.

С точки зрения реализации ТГ метода важно определить зависимость температуры материала от его влагосодержания для конкретных условий измерений.

Из анализа возможных вариантов реализации ТГ метода измерения влажности следует, что его можно синтезировать с методом гиротермического равновесия.

В работе дана методика расчета составляющих погрешности, проведены расчеты на примере шерстяной ткани, построены графики зависимости погрешностей измерения от влагосодержания материала. По результатам приведенного структурного анализа погрешностей сделан вывод, что разработанный метод действительно практически исключает погрешность, причем, связанную с изменением состава материала.

## Учет неоднозначной нелинейности технологического объекта компьютерной системой управления

Современные компьютерные системы управления нелинейными технологическими объектами обеспечивают автоматическое изменение шага квантования контролируемого параметра, используя известные алгоритмы прогнозирования, успешность реализации которых во многом определяется быстродействием вычислительного блока.

Задача, однако, значительно усложняется, когда нелинейность объекта управления приобретает неоднозначность с элементами периодичности. При неудачном соотношении шага квантования и периода колебательного процесса возможны значительные искажения оценки состояния технологического агрегата и ошибочные действия исполнительных органов [1].

Примером подобных проявлений является система компьютерного управления электротехнологическим агрегатом, зависимости параметров рабочей зоны которого могут быть не только неоднозначно нелинейны, но и иметь, например, участки с отрицательным электрическим сопротивлением [2], дрейфующие в пространстве и во времени.

Попытки прямого воздействия на состояние рабочей зоны изменением электрического режима фаз с такого рода нелинейностью могут привести к дополнительной раскачке системы и последующей потере управляемости.

Поэтому в результате проведенных в данной работе исследований был разработан алгоритм управления электрическим режимом электротехнологического агрегата, предусматривающий опосредованное управление рабочей зоной фазы, находящейся на нелинейном участке технологического процесса через изменение электрического режима двух других фаз. Реализация такого алгоритма, основанного на управлении по расчетным критериям, произведена программными средствами на языке Си. Моделированием разработанной системы управления средствами пакета Matlab получены характеристики, отражающие особенности ее практического применения.

### Литература

1. **Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления** / Д.А. Белова, Р.Е. Кузин. – М.: Энергия, 1979. – 264 с.
2. **Калмыков Ю.В.** Влияние нелинейности междуэлектродных цепей на управляемость электрического режима руднотермической печи // Изв. ВУЗов: Электротехника. – 1987. – №7. – С. 112-114.

## **Концепция авторейнжининга бизнес-процессов предприятия**

В настоящее время к методам организации деятельности современных машиностроительных предприятий предъявляются особенно высокие требования. При этом особое внимание уделяется организации единого информационного пространства (ЕИП), которое, в соответствии с концепцией CALS призвано обеспечить информационную поддержку всех этапов жизненного цикла изделия.

Организация ЕИП производится на основе комплексного реинжининга бизнес-процессов предприятия – сложной инженерной задачи, для решения которой необходимо привлечение квалифицированных специалистов на достаточно длительный срок.

Вместе с тем, весьма актуальным является построение ЕИП предприятия как синергетической системы, обладающей свойством обмена энергией с внешней средой, представленной в виде участников жизненного цикла изделия.

При таком подходе механизмы реинжининга сохраняют свою актуальность, однако сама процедура модификации бизнес-процессов предприятия носит перманентный характер и управляется событиями, генерируемыми самим единым информационным пространством и внешней по отношению к нему средой.

Таким образом, производится авторейнжининг бизнес-процессов предприятия [1, 2]. На основе знаний, постоянно накапливаемых в ЕИП, и внешних событий производится мониторинг и корректировка бизнес-процессов предприятия, структуры ЕИП и архитектуры автоматизированной информационной системы управления предприятием.

Реализация такого подхода возможна путем создания интеллектуальных систем, интегрированных в ЕИП предприятия, функциональность которых включает возможность анализа и модификации структуры ЕИП в соответствии с изменениями требований к жизненному циклу изделия и появлением закономерностей обработки знаний.

Данный подход может быть реализован путем интеграции современных решений в области управления инженерными данными и жизненным циклом изделия, как построенных на базе коммерческих PDM/PLM и ERP систем, так и разработанных с использованием мощных СУБД.

### **Литература**

1. **Иващенко А.В.**, Митришкина М.Е. Проектно-производственная модель единого информационного пространства предприятия. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – 152 с.
2. **Иващенко А.В.**, Кременецкая М.Е. Авторейнжининг единого информационного пространства предприятия. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – 116 с.

## Алгоритмы автореинжиниринга бизнес-процессов предприятия

Единое информационное пространство современного предприятия можно рассматривать как открытую саморазвивающуюся сложную систему. При этом входными данными являются знания, поступающие от конструктора и технолога в виде комплектов документации либо расширенный структуры ЕИП, а выходными данными можно считать разнообразные отчеты, получаемые путем аналитической обработки имеющихся знаний.

В этом случае управление ЕИП состоит не только в обеспечении его функционирования, путем решения задачи интеграции автоматизированных информационных систем различного профиля, но и в организации процессов его эволюции.

Для обеспечения такого подхода необходимо построить модель ЕИП [1] и разработать алгоритмы управления его содержимым. При построении этих алгоритмов можно использовать общий принцип анализа накапливаемых в ЕИП знаний, и выработки управления по изменению поведения ЕИП. Например, на основе анализа абстрактного показателя числа эквивалентных исполнений, возможна модификация бизнес-процесса по документообороту при конструкторско-технологической подготовке производства и модульной структуры хранения технологических процессов [2]. Данный алгоритм позволяет производить анализ данных, поступающих в PDM-систему из САПР, и на основе сравнения новых структур с уже имеющимися знаниями генерировать обобщения. Таким образом, возможна оптимизация механизма хранения знаний в ЕИП и формирования требуемых отчетов.

Реализация алгоритмов автореинжиниринга должна предшествовать процедуре организации ЕИП предприятия. Открытый характер единого информационного пространства позволяет не только внедрить интеллектуальные системы управления ЕИП, но и обеспечить возможность его расширения за счет включения новых подсистем.

Внедрение разработанных алгоритмов на предприятии тяжелого машиностроения позволяет сделать вывод об актуальности разработки автоматизированных систем управления ЕИП как сложной системой.

### Литература

1. **Иващенко А.В.**, Митришкина М.Е. Проектно-производственная модель единого информационного пространства предприятия. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – 152 с.
2. **Иващенко А.В.**, Кременецкая М.Е. Автореинжиниринг единого информационного пространства предприятия. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – 116 с.

## Гипервекторное изображение несинусоидальных электрических величин

При решении задач функционирования РЗА необходимо анализировать переходные процессы. Для этого в [1] разработан графический интерфейс пользователя системы моделирования и векторное представление только синусоидальных электрических величин. Возможность представления несинусоидальных электрических величин с комплексной частотой разработана в [2].

Наглядное гипервекторное представление несинусоидальных электрических величин приведено на рис. 1.

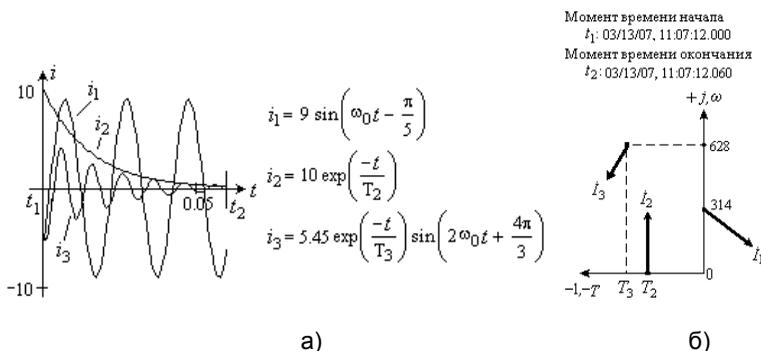


Рис. 1. Гипервекторное представление несинусоидальных электрических величин

### Литература

1. **Лифшиц А.С.**, Мурзин А.Ю. Графический интерфейс пользователя системы моделирования переходных процессов в ЭЭС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – Т. 3. – С. 280–281.
2. **Атабеков Г.И.**, Мамиконянц Л.Г. Применение комплексных схем замещения для расчета переходных процессов. – Электричество, – 1968. – № 4. – С. 67–68.

УДК 28;50

Н.П. ХАРИШ, ст. преподаватель, И.Е. ХАРИШ, ассистент  
(ПГТУ, г. Пятигорск)

## Синтез регулятора системы управления параметрами водозаборных скважин

Объектами исследования на Георгиевском месторождении являются термальные воды. Процесс водоотбора из геотермального пласта осуществляется через водозаборные скважины. Разработана система управления расходом водозабора рассматриваемых скважин, обеспечивающая заданные параметры депрессионной воронки. Математическая модель рассмотренного выше объекта управления описана в работах [1,2].

Входным воздействием на систему управления является желаемое понижение уровня, которое связано соотношением (1) с расходом. Изменяя расход, управляем понижением уровня в зоне заборных скважин  $\tilde{S}(y, \tau)$ . Функцией выхода системы управления служит текущее понижение уровня в зоне расположения контрольных скважин  $S(x = x^*, y, \tau)$ .

Входное воздействие (понижение уровня в зоне расположения водозаборных скважин) представлено в виде:

$$S(x = \hat{x}, y, \tau) = C_\eta \cdot \cos(\psi_\eta \cdot y) \cdot \exp(j\omega\tau), \quad (1)$$

где:  $C_\eta$  - заданные числа ( $\eta = \overline{1, \infty}$ );  $\Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{y_L}$ ;  $\omega$  - круговая частота;  $\hat{x}$  -

координата расположения заборных скважин. Для системы управления рассматриваемым объектом синтезирован распределенный высокоточный регулятор со следующими показателями: запас устойчивости по фазе  $-\Delta\phi \geq \pi/6$ ; по модулю  $-\Delta L \geq 10db$ , значение параметра  $\Delta = 0,45$ . Передаточная функция РВР имеет вид [3]:

$$W(y, p) = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p, \quad (2)$$

где:  $E_i, n_i$  – параметры, определяемые в процессе синтеза.

Определение параметров регулятора будем осуществлять, исходя из условия, что значения частот  $\omega_\eta$  принадлежат линии перегиба. Для частот  $\omega_\eta$ , принадлежащих линии перегиба, фазовый сдвиг, вносимый в разомкнутую систему регулятором, равен нулю. Подставляя

$\omega = \omega_1$ ,  $\omega = \omega_4$  в  $\lg \omega = 0,5[\lg K_4(G) - \lg K_2(G)]$ , получим следующую систему уравнений:

$$\lg \omega_1 = 0,5 \cdot \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{\Psi_1^2}{n_4} \right] \right) - 0,5 \cdot \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{\Psi_1^2}{n_2} \right] \right) \quad (3)$$

$$\lg \omega_4 = 0,5 \cdot \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{\Psi_4^2}{n_4} \right] \right) - 0,5 \cdot \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{\Psi_4^2}{n_2} \right] \right) \quad (4)$$

Вычитая из (4) (3), приходим к следующему результату:

$$\lg \Delta \omega^2 = \lg \left( \frac{n_4 - 1 + \Psi_4^2}{n_4 - 1 + \Psi_1^2} \right) - \lg \left( \frac{n_2 - 1 + \Psi_4^2}{n_2 - 1 + \Psi_1^2} \right), \text{ где } \Delta \omega^2 = \frac{\omega_4^2}{\omega_1^2} \quad (5)$$

Используя соотношения (5), были вычислены значения параметров распределенного высокоточного регулятора для системы управления параметрами водозаборных скважин:  $n_4 = 2,8$ ;  $E_4 = 0.106$ ;  $E_2 = 3.34$ ;  $n_2 = \infty$ ;  $n_1 = 10^8$ ,  $E_1 = 22612$ . Синтезирован регулятор, передаточная функция которого записывается в виде:

$$W(y, p) = 22612 + 0.106 \cdot \left[ \frac{1.8}{2.8} - \frac{1}{2.8} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + 3.34 \cdot p. \quad (6)$$

#### Литература

1. **Лукнер Л.**, Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1980.
2. **Хариш Н.П.** Математическая модель гидродинамических процессов геотермального пласта // Сб. докл. Междунар. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика». ПГТУ. – Пятигорск, 2006.
3. **Першин И.М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007.

## СЕКЦИЯ 4. НАДЕЖНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТАНЦИЙ И ЭНЕРГОСИСТЕМ

УДК 621.312.004

А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., профессор, И.Н. СУЛЫНЕНКОВ, Н.Н. БРЕЗГИНОВ, аспирант (ИГЭУ)

### **Сбор, обработка, анализ и применение статистики по отказам электрооборудования электростанций**

Анализ существующей системы сбора и обработки информации о нарушениях в работе электрооборудования (ЭО) электроэнергетических систем (ЭЭС) показал, что данная система недоработана и не учитывает современного способа ведения хозяйства. В результате отсутствия необходимой статистической информации по отказам ЭО становится невозможным применение методик по оценке показателей надежности конкретной единицы электрооборудования, определение уровня структурной надежности и т.д. В этих условиях возникает необходимость создания автоматизированного программного комплекса (АПК) информационно-справочных и информационно-аналитических систем для сбора и обработки статистической информации различных видов и типов ЭО ЭЭС.

Данный АПК предназначен для сбора, хранения, обработки и использования следующей информации:

- паспортных данных элементов ЭО, их подробных технических характеристик, сведений о ремонтах;
- текущих дефектах, причин их возникновения и способов устранения;
- сведений об авариях, отказах и автоматических отключениях, моментов времени возникновения событий.

АПК позволит решить как типовые задачи обеспечения надежности функционирования ЭЭС, так и задачи определения и обеспечения надежности работы конкретного ЭО ЭЭС:

- оптимизация структуры резервирования с учетом надежности;
- диагностика и прогнозирование технического состояния;
- поиск мест отказов и неисправностей;
- неразрушающего и статистического контроля качества;
- определение и анализ единичных и комплексных показателей надежности;
- планирование отдельных операций с учетом надежности;
- оценка надежности оператора при его взаимодействии с ЭО;
- оперативный контроль и управление функционированием;
- оценка надежности по разнородной статистической информации;
- обоснование ускоренных и утяжеленных испытаний.

Результатами работы автоматизированного программного комплекса являются выборки с их статистической обработкой и расчетом показателей надежности.

## **О термической стойкости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**

Наибольшее распространение в отечественной энергетике для распределительной сети СН получили кабели с алюминиевыми жилами с бумажной пропитанной изоляцией (более 90 % общей потребности). Данные кабели характеризуются следующими параметрами теплового состояния в длительном режиме работы и в режиме КЗ: длительно допустимая температура на поверхности жилы + 65°C; предельная температура по условиям термической стойкости + 200°C. В последние годы привлекают внимание кабели с изоляцией из «сшитого полиэтилена» (СП-кабели). Повышение их теплостойкости достигается за счет поперечной сшивки линейных молекул полиэтилена через радикалы углерода или цепочки кремний-кислород. Большинство крупных энергосистем ориентируется в будущем на использование СП-кабелей, в том числе и в системе СН.

СП-кабели по сравнению с кабелями с бумажной изоляцией имеют другие характеристики теплового состояния: длительно допустимая температура на поверхности жилы + 90°C; предельная температура по условиям термической стойкости + 250°C.

Улучшенные тепловые характеристики создают иллюзию решения большинства проблем, связанных с обеспечением термической стойкости при переходе на кабели нового поколения.

В работе показано, что при достаточно высоких коэффициентах загрузки агрегатов СН на электростанциях в длительном режиме начальные температуры СП-кабелей перед режимом КЗ будут значительно выше, чем у кабелей равного сечения с бумажной изоляцией. Таким образом, значения предельных по условиям термической стойкости интегралов Джоуля (греющих импульсов) у СП-кабелей будут ниже, чем у кабелей с бумажной изоляцией. Компенсация разницы в значениях предельных интегралов Джоуля за счет значительного снижения коэффициентов загрузки СП-кабелей в нормальном режиме (равнозначно увеличению сечения) не всегда экономически целесообразна.

Приводятся рекомендации по рациональному использованию СП-кабелей в системе СН электростанций.

### **Литература**

1. **Циркуляр** №Ц-02-98 (Э). О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания. Изд. Департамента стратегии развития РАО «ЕЭС России», СПО ОРГРЭС, 1998.

УДК 621.311.016

А.В. МАКАРОВ, к.т.н., А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., Н.А. МАКАРОВ, аспирант (ИГЭУ)

## **Обеспечение надежности схем распределительных устройств энергообъектов за счет предотвращения феррорезонансных явлений**

Термином «феррорезонанс», который впервые появился в литературе в начале 20 века, относится к явлению нелинейных резонансных автоколебаний, возникающих в электрической цепи, содержащей: нелинейные индуктивности, емкости и источники синусоидального напряжения. Схемы с указанным набором элементов, но со сложной топологией могут возникать в электроэнергетических системах и вызывать перенапряжения, сверхтоки и ненормальное увеличение гармонических составляющих в переходных и установившихся режимах. Это представляет опасность для электрооборудования и может вызвать серьезные повреждения его, возникновение и развитие «цепочечных» аварий.

В докладе приводятся материалы по исследованию феррорезонансных явлений на энергообъектах в электрических цепях 110-750 кВ. Особое внимание уделено исследованию феррорезонансных явлений, которые возникают в ремонтных режимах в схемах распределительных устройств, при неполнофазных включениях трансформаторов и на линиях электропередач при поперечной и продольной компенсации. Для исследования указанных феррорезонансных схем на основе методов анализа нелинейных электрических и магнитных цепей разработаны их математической модели для расчета переходных и установившихся процессов. Данные модели позволяют исследовать причины, влияющие на возникновение и характер протекания феррорезонансных явлений, величину перенапряжений и токовых перегрузок, а также планировать мероприятия по их предотвращению.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов построены уточненные области «опасных параметров» феррорезонансных схем, позволяющие определять возможность повреждения оборудования в зависимости от режима, схемы и состава оборудования. Достоверность полученных результатов моделирования подтверждена путем сопоставления их с режимами реальных случаев феррорезонанса, которые зарегистрированы в энергосистемах России.

Применение разработанных моделей позволит обеспечить надежность распределительных устройств в системе электроснабжения потребителей и на магистральных линиях электропередач. Имеется возможность, не прибегая к натурным испытаниям, с высокой степенью достоверности производить расчет и определять возможность повреждения трансформаторов напряжения и иного оборудования энергосистем при возникновении феррорезонансных явлений, а также планировать и оценивать эффективность мероприятий по их предотвращению.

## **Анализ современных схем распределительных устройств на напряжение 220 кВ и выше**

В нормах технологического проектирования подстанций и рекомендациях Федеральной сетевой компании значительно изменились требования к главным схемам распределительных устройств. Необходимо применять схемы с более высокой надежностью, исключающие полное погашение распределительного устройства, а с другой стороны рекомендуются упрощенные схемы.

Сравнение схем производится на примере электростанции с четырьмя блоками и шестью линиями. Анализировались следующие схемы: «одиночная секционированная система шин», «две рабочие системы шин с обходной системой шин с двумя шиносоединительными выключателями, соединенными последовательно», «две рабочие системы шин с подключением двух присоединений через три выключателя», «4х6». В первую очередь рассчитывалась надежность схем. Определялось число полных погашений распределительного устройства, отключение одного или двух блоков.

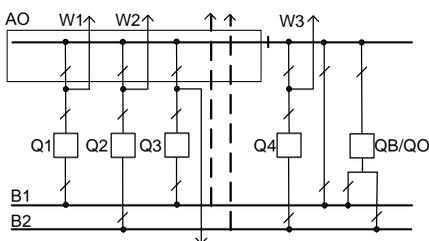
Проведенный анализ позволили сделать следующие выводы. Наиболее надежной является схема 4х6. В ней отсутствуют режимы, в которых возможны полное погашение распределительного устройства или одновременное погашение сразу двух блоков. Отсутствуют сборные шины, что значительно повышает надежность при проведении ремонтных работ. Схема экономичная, так как на десять присоединений приходится всего двенадцать выключателей.

Схема с двумя рабочими системами шин с подключением двух присоединений через три выключателя допускает ситуации, при которых происходит отключение сразу двух блоков во время наложения отказов на ремонтные работы. Во время ремонта одной из систем шин сохраняется подключение всех присоединений. Основным недостатком схемы является низкая экономичность, так как она имеет пятнадцать выключателей. Кроме того, большая вероятность каскадного развития аварии при замыкании на шинах. Такое повреждение отключается сразу пятью выключателями.

Схемы со сборными шинами и секциями имеют более низкую пригодность к проведению ремонтов по сравнению с выше приведенными схемами, что вытекает из необходимости отключать присоединения или переводить их на одну систему шин во время ремонта одной из секций или систем шин. Данные схемы менее надежны. Применение дополнительно секционирования и другие мероприятия несколько снижают отмеченные недостатки.

## Новый взгляд на «старую» схему

В настоящее время на действующих подстанциях напряжением 110, 220 кВ проводится реконструкция РУВН с заменой устаревшего коммутационного оборудования. При этом часто встает вопрос о проведении реконструкции схемы РУВН, т.к. появляется возможность ее оптимизации параллельно с заменой выключателей. На ряде подстанций 110 кВ эксплуатируются РУВН со схемой «одиночная секционированная система шин с обходной с совмещенным обходным и секционным выключателем», приведенной на рисунке.



Эта схема рекомендовалась ранее для РУВН 110 кВ, т.к. она экономичнее варианта схемы с отдельными обходным и секционным выключателями. Недостаток схемы: на все время использования совмещенного выключателя QB/QO как обходного нарушается параллельная работа линий и трансформаторов. Из-за

чего, впоследствии схема была исключена из числа рекомендуемых схем.

В настоящий момент при реконструкции РУВН согласно НТП выключатели старого типа заменяются на высоконадежные элегазовые, из-за чего появилась возможность взглянуть на «старую» схему по-новому и пересмотреть устоявшееся негативное отношение к ней.

При применении элегазовых выключателей ввиду их высокой надежности и малой продолжительности ремонтов отпадает необходимость в обходной системе шин (ОСШ) и для ее установки на вновь проектируемых объектах согласно НТП требуется специальное обоснование. Таким образом при замене в приведенной схеме выключателей на элегазовые, даже при сохранении функции QO выключателя QB/QO указанный выше недостаток схемы сводится к минимуму. Подсчет продолжительности использования выключателя QB/QO как QO для вариантов реальной схемы с многообъемными масляными и новыми элегазовыми выключателями показал, что во втором случае она снижается в 40(50)раз. Поэтому можно сделать вывод о том, что с новым коммутационным оборудованием «старая» схема способна улучшить свои эксплуатационные свойства и практически не нуждается в реконструкции. Однако для снижения количества обслуживаемого оборудования можно рекомендовать демонтаж участков ОСШ и ее шинных разъединителей (см. выделенное на рисунке) для присоединений линий W1 и W2 (две цепи двухцепной линии), т.к. при ремонте выключателей Q1 и Q2 нет необходимости использования обходной цепочки. При этом не менять ячейку одиночной линии W3, т.к. для ремонта ее выключателя функцию QO совмещенного выключателя целесообразно сохранить.

УДК 621.316.062

Д.А. АНДРЕЕВ, к.т.н., ассистент,  
А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., профессор, ПЕДРО АНТОНИО, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Учет климатических условий Анголы при оценке эксплуатационной надежности действующего электрооборудования**

Эксплуатационная надежность электрооборудования (ЭО) во многом определяется условиями и режимами его работы. Существенное влияние на функционирование ЭО оказывают климатические условия площадки установки. Наиболее важным климатическим фактором, влияющим на процессы износа ЭО и, соответственно, его надежность являются температурные условия окружающей среды.

В Анголе преобладает тропический муссонный климат на севере, и субтропический – на юге. Средняя годовая температура около  $+21^{\circ}\text{C}$ . Выделяется два основных сезона: сухой и прохладный в период с апреля по сентябрь (средняя температура от  $+16^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$ ), а также дождливый и жаркий в период с октября по март (средняя температура от  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ ). Для Анголы характерны большие суточные перепады температур, особенно в южных, пустынных районах, где иногда наблюдается понижение температуры воздуха в ночное время до  $0^{\circ}\text{C}$ .

Климат Анголы с ее высокими среднесуточными температурами не может не оказывать негативного влияния на процессы износа ЭО. В первую очередь это относится к электрической изоляции. Если температура в тени достигает  $+35^{\circ}\text{C}$ , то она солнце она может составлять  $+50^{\circ}\text{C}$  и даже более градусов по Цельсию. Это необходимо учитываться при оценке показателей эксплуатационной надежности ЭО.

В [1] разработан комплексный подход к оценке показателей долговечности (технического ресурса) и безотказности (вероятностей безотказной работы и отказа) ЭО, который позволяет учесть температуру окружающей среды и с учетом этого скорректировать наработку ЭО и получить оценки фактического сработанного и остаточного ресурса.

В рамках данного подхода проведены расчеты указанных показателей долговечности и безотказности, которые позволили оценить влияние изменение сезонных суточных температур воздуха в различных областях страны на ресурс силовых масляных трансформаторов мощностью до 100 МВА. Результаты расчетов показывают, что работа трансформаторов при номинальной нагрузке при повышенных температурах окружающей среды приводит к снижению его нормативного ресурса и вероятности безотказной работы более чем на 10 %.

### **Литература**

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.

В.П. БАКУТА, главный энергетик  
(ОАО «Саратовский НПЗ»)  
В.С. КОПЫРИН, к.т.н., профессор  
(НПП «ЭНЭК», г. Екатеринбург)

## Пути повышения энергетической безопасности нефтеперерабатывающего завода

Эффективность производства нефтепродуктов (НП) во многом определяется уровнем электроэнергетической безопасности (ЭБ) нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) [1]. Это обусловлено рядом факторов:

требованием высокой надежности электроснабжения; большой энергоемкостью; необходимостью наличия 100% резерва электрооборудования, обеспечивающего бесперебойное ведение технологических процессов; большой энергоемкостью; значительным удельным электропотреблением на получение 1 т каждого вида НП; большим экономическим ущербом при перерывах в электропитании; непрерывностью технологических процессов; возможностью значительного негативного влияния на окружающую среду; повышенными пожаро- и взрывоопасностью; наличием нелинейных приемников электроэнергии и электроприводов большой мощности (до 6 МВт).

Поэтому повышение ЭБ НПЗ относится к числу приоритетных направлений технической и экономической политики в ОАО «Саратовский НПЗ». Для его реализации на первоначальном этапе разработаны основные теоретические положения ЭБ НПЗ [1]:

обоснована актуальность ЭБ НПЗ; сформулировано определение ЭБ производства НП; предложен комплексный показатель ПЭБ, позволяющий количественно оценить уровень энергетической безопасности, и методика его расчета; обоснованы уровни ЭБ в соответствии с внешней и внутренней системой электроснабжения и электропотребления НПЗ; предложена концепция ЭБ производства НП.

На втором этапе разработаны основные пути реализации теоретических положений с использованием предложенной стратегии ЭБ производства НП применительно к ОАО «Саратовский НПЗ».

### Литература

1. **Копырин В.С.,** Бакута В.П. Энергетическая безопасность нефтеперерабатывающего завода // Энергоанализ и энергоэффективность. – 2005. – № 6.

## **Риски субъектов рынка электроэнергии**

Одним из важнейших элементов хозяйственной деятельности в энергетике является риск. Он растет, и оценка его – актуальная задача обеспечения надежности электроснабжения, энергетической и экономической безопасности государства. Это связано с безопасностью жизнедеятельности; определяющей ролью энергетики в экономике; особенностями технологии отрасли и электроэнергетической продукции, управления энергетическими объектами; отсутствием полной информации о технологических, экономических и финансовых режимах работы субъектов рыночных отношений; наличием конкурентных тенденций; неопределенностью будущих условий работы; возможными ошибочными решениями, принимаемыми на разных уровнях технического, экономического и организационного управления субъектами рынка.

Отрасль претерпевает серьезное реформирование, переходит на рыночные отношения, рынок либерализуется, создаются условия для конкуренции. Преобразования проводятся в сжатые сроки, что увеличивает динамичность происходящих процессов. На первый план выходят вопросы устойчивости, адаптивности к новым условиям и обеспечения перспективной надежности. В менеджменте это проявляется в росте роли управления рисками, придании ему должного значения, более пристальном внимании к нему всех субъектов рыночных отношений. В область интересов электроэнергетических компаний попадают: неопределенность условий деятельности при либерализации отрасли; масштабные реорганизации и перемещения активов, увеличивающие корпоративные риски; нестабильность режима регулирования, постоянные изменения «правил игры» на рынках электроэнергии; увеличение ценовых рисков при переходе к рыночному механизму ценообразования; исчезновение административного ресурса, позволяющего контролировать взаимоотношения генерирующих и сбытовых компаний, квалифицированных и розничных потребителей, что увеличивает кредитные риски, связанные с оплатой электроэнергии и услуг; неоднозначное восприятие преобразований потребителями, региональной властью и другими субъектами, означающее рост нефинансовых рисков.

Осознание высокой степени риска аварий делает важнейшей задачей в области управления операционными рисками развитие системы технического регулирования, оптимизирующей соотношение между повышением безопасности и снижением рисков с одной стороны и необходимыми дополнительными затратами субъектов отрасли, с другой.

Методологическая основа управления рисками – это комплексная программа организации управления рисками, играющая ключевую роль в обеспечении надежности и эффективности энергосистемы страны.

## **О перенапряжениях на электрооборудовании, коммутируемого вакуумными выключателями**

Для выбора защиты изоляции электрооборудования (ЭО), коммутируемого вакуумными выключателями (ВВ), необходимо провести расчет и анализ уровней перенапряжений, возникающих на ЛЭП 6-10 кВ, при их коммутации. При этом производится выбор количества и места установки средств защиты от коммутационных перенапряжений (КПН).

Коммутация элемента сети вызывает переходный процесс (ПП), так как сеть является совокупностью индуктивностей и емкостей ЭО. ПП имеет вид затухающих колебаний, в процессе которых напряжение на емкостях оборудования относительно земли или между фазами может достигать до 8-9 кратного номинального напряжения  $U_n$ .

Основными причинами КПН на изоляции отдельной линии при отключении нагрузки, являются ток среза ( $I_{ср}$ ) и эскалация напряжения. Срез тока возникает при отключении малых индуктивных токов (например, холостого хода трансформаторов и другого ЭО).

Причиной среза тока в ВВ с гашением дуги в газовой среде являются интенсивное дутье и образование высокочастотных колебаний (ВЧК) на спадающем участке синусоиды отключаемого тока. ВЧК, развивающиеся в активно-индуктивно-емкостном контуре, налагаются на ток частотой 50 Гц. При этом суммарный ток в дуговом промежутке переходит через ноль и происходит гашение со срезом. В ВВ причиной среза тока является неустойчивость дуги при малых токах, которая горит в парах металла контактов. При срезе тока в индуктивности нагрузки накапливается энергия, которая, при последующим ее освобождении на емкость линии, может вызвать перенапряжение.

Величина КПН определяется индуктивностью нагрузки, емкостью линии и величиной  $I_{ср}$ . Последний параметр зависит от конструктивного исполнения ВВ и материалов контактов. При значительной длине линии КПН могут не возникнуть. Наличие активной нагрузки на вторичной стороне отключаемого ЭО снижает возможный уровень возникновения перенапряжений по причине среза. Повышенные КПН возникают при отключении малого индуктивного тока.

Факторы, влияющие на величину КПН:  $I_{ср}$ , многократные повторные зажигания (МПЗ) дуги, параметры линии и ЭО. МПЗ создают серию импульсов КПН с крутыми фронтами, опасными для витковой изоляции.

Возникновение МПЗ дуги в выключателе зависит от условия существования дуги в вакууме в области малых токов и скорости восстановления напряжения на контактах ВВ.

Анализ проводится для операции отключения, т.к. включение не является основанием возникновения опасных КПН по причине достаточного успокаивающего влияния питающей системы на возникающие ПП.

## Использование нейросетей в задачах определения показателей качества электрической энергии

Использование искусственных нейронных сетей в математическом планировании многофакторных экспериментов (МФЭ), является следующим шагом в организации и проведении экспериментальных исследований. Моделирование с помощью нейросетей позволяет воспроизводить сложные зависимости, когда неизвестен точный вид связей между входами и выходами. В этом случае природа исследуемого объекта не имеет существенного значения. Объект представляется моделью «черного ящика», характеризующегося набором входных факторов  $x$  и выходных показателей  $y$ . Основными задачами МФЭ являются: выделение наиболее существенных факторов, влияющих на показатели  $y$  (*качество электрической энергии*); построение адекватных моделей зависимости  $y = f(x_1, \dots, x_k)$  в интересующей области режимов; элиминирование влияния на показатели  $y$  действия неуправляемых факторов – источников неоднородностей. Использование МФЭ позволяет в значительной степени формализовать процесс исследования сложных объектов, сократить число опытов и время их проведения, получить наиболее полную информацию из эксперимента в виде математических моделей, пригодных для количественной оценки влияния факторов, влияющих на показатели качества и нахождения оптимальных режимов, контроля и управления объектами.

Решение такого рода задач предусматривает выбор основных показателей, характеризующих качество электроэнергии.

Основными факторами, влияющими на значения показателей качества электроэнергии, являются различные нарушения и искажения формы питающего напряжения поступающие из энергосистемы: например грозовые импульсы, коммутационные перенапряжения, провалы и отклонения напряжения во время автоматического включения резерва (АВР) и переключения потребителей на другие источники питания; мощность питающей энергосистемы, а так же сами электроприемники с резкопеременным и нелинейным характером нагрузок: всевозможные преобразователи, промышленные потребители, электрический транспорт, и т. д.

Целесообразность применения регрессионных моделей для описания зависимости выходных параметров от ограниченного числа существенных входных факторов при управлении режимами электроэнергетических систем отмечалась еще в типовой инструкции Минэнерго СССР по оптимальному управлению напряжением и мощностью в сетях энергосистем. Построение таких моделей с использованием нейросетей существенно снимает трудности построения моделей, обеспечивает повышение их качества и необходимую точность.

## Моделирование электромагнитных процессов в вертикальном цилиндрическом заземлителе

Заземляющие устройства являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем, влияющие на надежность их работы и безопасность обслуживающего персонала. Большинство методов расчета заземляющих устройств основывается на модели потенциала постоянного тока и сводятся к расчету активного сопротивления заземляющего устройства [1]. В реальных условиях в заземляющих устройствах протекают переменные токи промышленной частоты и импульсные токи. Для учета отмеченных факторов анализ электромагнитных процессов должен проводиться на основе системы уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\sigma} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{D} = \rho; \operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (1)$$

Здесь предлагается расчет электромагнитного поля уединенного вертикального цилиндрического заземлителя при протекании переменного тока промышленной частоты. Модель заземлителя состоит из самого цилиндрического заземлителя, переходного слоя растекания тока между землей и заземлителем и собственно земли с соответствующими электрическими проводимостями и магнитными проницаемостями.

Дифференциальные уравнения поля для каждого слоя в установленном режиме можно разрешить относительно любой из компонент поля. С учетом отмеченного расчет токораспределения в заземлителе сводится к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\gamma_{ri}}{r} \frac{\partial \vec{\varphi}_{im}}{\partial r} + \gamma_{ri} \frac{\partial^2 \vec{\varphi}_{im}}{\partial r^2} + \gamma_{zi} \frac{\partial^2 \vec{\varphi}_{im}}{\partial z^2} - \dot{\alpha}^2 \vec{\varphi}_{im} = 0; \quad \dot{\alpha}^2 = j\omega\gamma_{ri}\gamma_{zi}\mu_{\varphi i}, \quad (2)$$

где  $\vec{\varphi}_{im}$  принимает значения векторов плотности тока  $\vec{\sigma}_{im}$  или напряженностей электромагнитного поля  $\vec{E}_{im}$  или  $\vec{H}_{im}$ ;  $i = 1, 2, 3$ .

Для рассматриваемого заземлителя на основе решения (2), используя метод разделенных переменных, получены выражения в виде ряда для определения вертикальной и радиальной составляющих плотности тока. При этом предварительно устанавливались зависимости радиального и вертикального токов от соответствующих координат с целью определения граничных условий. Полученные выражения позволяют определять области растекания токов в заземлителе, а также активные и индуктивные параметры заземляющих устройств.

### Литература

1. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 399 с.

## Об определении технического ресурса электрооборудования при воздействии эксплуатационных факторов

Ухудшение технического состояния электрооборудования (ЭО) происходит непрерывно как при работе в нормативных, так и в ненормативных условиях эксплуатации. Это связано с накопительным характером развития дефектов и повреждений в конструктивных элементах и сборочных единицах ЭО. При утяжеленных режимах работы этот процесс происходит более интенсивно, а при облегченных менее интенсивно относительно номинальных условий эксплуатации. Поэтому необходимо выполнять корректировку нормативного ресурса  $R_0$  с учетом интенсивности воздействия эксплуатационных факторов в условиях реальной эксплуатации.

Допустим, что на ЭО действует некоторый эксплуатационный фактор  $X_i$ . При каждом увеличении фактора  $X_i$  на величину  $\Delta X_i$  фактический сработанный ресурс ЭО увеличивается в  $n$  раз, а при уменьшении уменьшается в  $n$  раз. Тогда запишем следующие выражения для вычисления фактического сработанного ресурса ЭО  $R$  в зависимости от изменения величины  $X_i$  [1]:

$$R = R_0 n^{\frac{(X_i - X_{0i})}{\Delta X_i}}, \quad (1)$$

где  $R$  – фактический сработанный ресурс ЭО при  $X_i = \text{const}$ ;  $X_{0i}$  – нормативное значение фактора  $X_i$ ;  $\Delta X_i$  – абсолютное отклонение фактора  $X_i$ , постоянная величина, определяемая в соответствии с [1] в зависимости от вида ЭО. При  $X_i = X_{0i}$  ЭО работает в нормативных условиях.

ЭО проектируется для эксплуатации в нормативных условиях с учетом узкого диапазона отклонений эксплуатационных факторов от своих нормативных значений. Нарботка до предельного состояния в нормативных условиях эксплуатации, описанных в паспорте на ЭО, должна соответствовать нормативному ресурсу  $R_0$ . При существенных отклонениях эксплуатационных факторов от своих нормативных значений скорость сработки ресурса может быть настолько велика, что сам переход ЭО из работоспособного состояния в предельное можно считать практически скачкообразным, тем более, если значения эксплуатационных факторов превышают предельно допустимые значения, установленные паспортными данными. При сравнительно небольших отклонениях эксплуатационных факторов от нормативных значений скачкообразного изменения технического состояния, а значит и значения фактического сработанного ресурса не происходит. Для этого случая может быть применена формула (1).

### Литература

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.

## Модель оценки расхода ресурса электрооборудования для энергосистемы Республики Ангола

Государственная энергетическая система Анголы (ГЭСА) представляет собой комплекс электростанций и сетей. Энергетическая сеть Анголы разделена на три энергосистемы севера, центра и юга. Источниками электроэнергии являются гидростанции, дизельные станции, газотурбинные установки. Основная сеть сформирована линиями 60-110 кВ. Оборудование ГЭСА было пущено в работу еще до провозглашения независимости в 1975 г., и имеет высокую степень износа. Кроме того, электрооборудование (ЭО) работает в тяжелых режимах работы и сложных климатических условиях тропического климата Анголы. Поэтому разработка математической модели расхода ресурса, учитывающей контролируемые параметры и тяжесть режимов работы ЭО, является актуальной задачей для.

Чем больше отклонение параметров от номинального значения, тем интенсивнее срабатывает ресурс ЭО. Тяжесть режима по  $i$ -ому параметру предлагается оценивать коэффициентом тяжести режима  $k_i$ , определяемому по выражению:

$$k_i = \frac{X_i}{X_i^{ном}};$$

где  $X_i$  и  $X_i^{ном}$  – соответственно текущее и номинальное значение  $i$ -го параметра,  $i=1\dots N$  – количество факторов, действующих на ЭО.

Значение коэффициента  $k_i < 1$  соответствует облегченному режиму работы ЭО по  $i$ -му фактору, а  $k_i > 1$  – утяжеленному режиму. Текущий режим работы ЭО характеризуется множеством значений  $k_i$  для всех действующих факторов. Отклонение любого фактора соответствует переходу ЭО в новый режим, которому соответствует новая скорость сработки ресурса. На установившемся режиме работы ЭО скорость сработки ресурса постоянна и вычисляется по выражению:

$$\frac{dR}{dt} = v = const \Rightarrow R(t) = \int_0^t v dt = vt,$$

где  $v$  – скорость сработки ресурса работы ЭО.

Подставляя значения скоростей в это выражение, получим зависимость ресурса от времени на заданном интервале времени. Общая зависимость  $R(t)$  будет представлять собой ломаную линию. При ее пересечении прямой, задаваемой уравнением  $R=1$ , ресурс ЭО срабатывает полностью.

## **Критерии оценки технического состояния и остаточного срока службы электрооборудования АЭС**

Основными средствами для увеличения производства электроэнергии АЭС является: 1) повышение коэффициента использования установленной мощности; 2) снижение издержек производства; 3) оптимизация сроков проведения ремонтных работ; 4) внедрение новых видов ядерного топлива для увеличения безопасности и сроков его эксплуатации; 5) уменьшение потребления на собственные нужды станции.

Приоритетным направлением развития атомной энергетики является продление срока эксплуатации действующих АЭС на 10–20 лет, соответственно продление сроков службы электрооборудования. Рассмотрим оценку технического состояния электрооборудования на примере КРУ-6 кВ.

Оценка технического состояния проводится путем анализа всех показателей испытаний, проводимых в течение всего срока службы с целью установления исправного состояния. Ячейка КРУ признается работоспособной, если все параметры, определяющие её работоспособность, соответствуют установленным нормам. Состав таких параметров определяется в соответствии с требованиями руководящих документов.

Остаточный срок службы КРУ (до окончательного вывода из эксплуатации) определяется старением изоляции КРУ, в том числе и старением изоляции комплектующей арматуры. Старение изоляции КРУ вызывает снижение ее пробивного напряжения.

Ресурс выключателей ячейки КРУ определяется также старением изоляции, кроме этого механическим износом деталей и коммутационным износом контактов выключателей. Оценка технического состояния КРУ при продлении срока эксплуатации только по результатам испытаний дает заниженные значения остаточного срока службы.

Кроме технического состояния при оценке остаточного срока службы электрооборудования необходимо так же учитывать и экономические факторы. Самый существенный экономический фактор – уменьшение стоимости денежных средств электрооборудования с течением времени. Критерий экономической составляющей – минимум среднегодовых дисконтированных затрат.

В докладе рассмотрены основные критерии оценки технического состояния электрооборудования. На основе проведенных исследований показана необходимость учета экономических факторов при определении остаточного срока службы.

УДК 621.314

В.К. КОЗЛОВ, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. ЭСиС,  
М.Ш. ГАРИФУЛЛИН, к.т.н., доцент, Д.М. ВАЛИУЛЛИНА, к.т.н., доцент  
(КГЭУ)

## Диагностика тепловых дефектов трансформаторов

Большая часть технологических нарушений маслонаполненного электрооборудования возникает в результате старения материалов, из которых выполнено оборудование, дефектов конструкции и недостатков эксплуатации [1].

Поскольку все дефекты в маслонаполненном электрооборудовании, так или иначе, связаны с термическим нагреванием, то они сопровождаются оптическим излучением (вследствие температурного свечения или разрядного явления) [2]. Температурное свечение возникает в результате нагревания контактов, в местах соединения отдельных элементов, при этом температура нагретого участка составляет порядка 1000 °С. Разрядные явления возникают, например, в результате разрядов в обмотках трансформатора, при этом температура нагретого участка увеличивается в десятки раз. Согласно законам излучения черного тела, существует максимум спектральной плотности энергетической светимости, который с повышением температуры смещается в сторону коротких волн. Таким образом, для диагностики состояния маслонаполненного электрооборудования на ранней стадии необходимо установить датчики, регистрирующие оптическое излучение, в первом случае в инфракрасной области, а во втором – в видимой и УФ областях спектра. Эта проблема может быть решена с помощью малогабаритного полихроматора, позволяющего регистрировать и изучать спектральный состав излучения дефектного участка

Для выполнения требований пожаро-взрывобезопасности излучение от места дефекта передается на полихроматор по световодному кабелю [3]. При проведении спектральных исследований в области длин волн 350–1200 нм мешающее влияние трансформаторного масла не наблюдается.

Таким образом, с помощью малогабаритного прибора контролируется большое число различных параметров, характеризующих состояние трансформатора в целом.

### Литература

1. **Чичинский М.Н.** Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // Энергетик. – 2000. – №11. – С.29-31.
2. **Козлов В.К.,** Гарифуллин М.Ш., Валиуллина Д.М. Перспективы использования спектральных методов при диагностике состояния трансформаторов // Энергетика Татарстана. – 2005. – №2. – С.36-40.
3. **Кирич И.Г.** Электрические изоляторы со световодами. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 32 с.

УДК 621.314

В.А. ЧЕРНЫШЕВ, д.т.н., профессор, Е.В. ЗЕНОВА, к.т.н., доцент,  
В.А. ЧЕРНОВ, аспирант, С.А. АРТЕМЕНКОВ, н.с.  
(СФ МЭИ (ТУ))

## **Диагностика состояния изоляции силовых трансформаторов, основанная на оценке токов деполяризации**

Сегодня большинство силовых трансформаторов в системах электроснабжения всего мира исчерпала запланированный срок своей жизни или приближается к нему. Поэтому проблемы связанные с разработкой методики контроля состояния оборудования, находящегося длительное время в эксплуатации, являются весьма актуальными.

Предлагаемая в работе методика заключается в сравнении параметра контроля с известными его значениями характерными для определенного состояния исследуемого изоляционного промежутка.

В качестве такого параметра контроля в работе используется зависимость коэффициента диэлектрических потерь от времени  $\varepsilon''(t)$ , измеренная во временном интервале 5 – 1200 секунд. Аналитически такую зависимость можно представить в виде:

$$\varepsilon'' = d * I(t) * t,$$

где  $\varepsilon''$  – коэффициент диэлектрических потерь,  $I(t)$  – ток деполяризации как функция от времени,  $t$  – время,  $d$  – константа.

Тогда задача оценки состояния изоляционного промежутка по экспериментально полученной зависимости  $\varepsilon''(t)$  сводится к определению степени соответствия полученной зависимости одной из реперных ее аналогов, система которых сформирована в виде некоторой шкалы оценок.

Данный метод был разработан и апробирован при исследовании физической модели, в качестве которой была выбрана изоляционная система конденсаторов типа МБГО-2, а также с помощью данной методика проводилась диагностика состояния изоляции силовых трансформаторов.

Как показывают полученные результаты контроля, данные подходы к диагностике целесообразно использовать в качестве предварительного анализа состояния изоляционной системы, когда необходимо принять решение о необходимости проведения дальнейших диагностических исследований.

УДК 621.

Р.А. АЖИЩЕВ, инженер  
(ОАО «Ивэлектроналадка»)

## **Комплексное обследование силовых трансформаторов**

Вопросы диагностики энергетического оборудования приобретают в последнее время все большую актуальность. Основная причина этому - повышение интенсивности использования большого парка оборудования исчерпавшего свой технический ресурс (нормативный срок службы обычно рассчитывается при постоянной работе в условиях нормальной температуры окружающего воздуха и нормальных условиях эксплуатации.)

Существующая нормативная система электрических испытаний силовых трансформаторов базируется на сравнении с исходными данными, указанными в паспортах и протоколах заводских испытаний, а также с результатами измерений, полученных для оборудования такого же типа, либо измеренными ранее на данном объекте. На основании сопоставления всех характеристик может быть дано заключение о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования. Общим недостатком методов профилактических испытаний является их низкая чувствительность к выявлению дефектов и практическая невозможность обнаружения локальных повреждений, особенно в начальной стадии их развития. Случаи отбраковки по выявленным этими методами дефектами не превосходят 3%.

Для выявления дефектов на ранней стадии кроме нормативной системы высоковольтных испытаний необходимо применять на практике и новые не требующие отключения оборудования методы диагностики силовых трансформаторов: хроматография; определение фурановых производных; тепловизионное обследование; вибродиагностика; измерение характеристик частичных разрядов.

Основная цель обследований – дать объективную оценку состояния трансформаторов, выявить дефекты оборудования, а также разработать рекомендации по устранению дефектов, проведению ремонтных работ и дальнейшей безаварийной эксплуатации этих электрических машин.

Каждый из видов испытаний не дает достоверной картины о виде повреждения, только при учете всех видов измерений, в совокупности с опытом и применением современных алгоритмов диагностики можно определить дефекты в силовом трансформаторе на ранней стадии, тем самым существенно сократить число аварийных ситуаций, связанных с эксплуатацией дефектного оборудования.

Итог проведенных комплексных обследований – переход к выводу в ремонт электрооборудования по его состоянию и сокращение аварийных ситуаций, связанных с эксплуатацией дефектного оборудования.

УДК 621.313

И.А. ЧУКРЕЕВА, студентка, А.А. РЕПИН, студент,  
А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н., ст. преподаватель  
(ИГЭУ)

## Расчет погрешности определения диагностического параметра состояния обмотки ротора электродвигателя по току статора

К наиболее повреждаемым частям асинхронных электродвигателей (АД), используемых на электростанциях (ЭС), относится обмотка статора, обмотка ротора (ОР) и подшипниковый узел. Одним из методов контроля ее состояния является определение отклонения скольжения от скольжения АД с исправной ОР ( $\Delta_s'$ ). При превышении данного диагностического параметра – 20% АД должен быть выведен в ремонт. Отклонение скольжения является разницей двух величин:  $s_{расч}$  – скольжения, рассчитываемого по формуле Клосса и  $s_{изм}$  – скольжения, определяемого по зубцовым гармоническим ОР, присутствующим в токе статора [1].

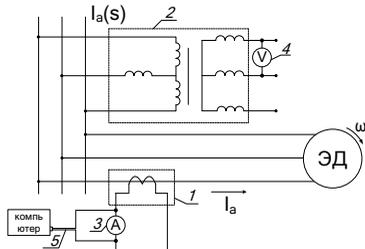


Рис. 1. Схема измерительной цепи  
1 – трансформатор тока; 2 – трансформатор напряжения; 3 – амперметр;  
4 – вольтметр; 5 – витая пара

применения данного метода контроля состояния ОР на существующих ЭС.

Проведенные расчеты  $\varepsilon_s$ , которые учитывали погрешности измерительных приборов, применяемых на ЭС, показали, что условие (1) выполняется.

Целью работы является доказательство правомерности использования этого метода на станциях путем расчета погрешности определения отклонения скольжения  $\varepsilon_s$ , которая обусловлена погрешностями устройств измерительной цепи (см. рис. 1) и методической погрешностью, для сравнения  $\varepsilon_s$  с величиной в 5 %.

Выполнение  
визия  $\varepsilon_s \leq 5\%$  (1) дает возможность

### Литература

1. **Филатов А.Н.**, Скоробогатов А.А. Определение скольжения по гармоникам тока статора с применением цифровой обработки сигналов // Радиозлектроника. Электротехника и энергетика: Тез. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Т. 3. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – С.146.

УДК 621.313

А.В. ЕРОФЕЕВ, студент, А.А. ЗАЙЦЕВ, студент, А.А. СКОРОБОГАТОВ, к.т.н.  
(ИГЭУ)

## Анализ зависимости погрешности определения скольжения двигателя по току статора от его нагрузки

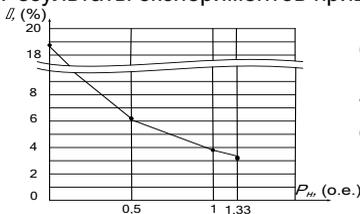
Известно, что состояние обмотки ротора электродвигателя (ЭД) можно определить по скольжению (С). В [1] описан метод контроля С по зубцовым гармоническим ротора, присутствующими в токе статора на работающем ЭД. Он более удобен в отличие от существующих (например, стробоскопического). В [1] приведена формула для определения минимально требуемого времени записи сигнала ( $T_{\text{изм}}^{\text{min}}$ ).

Цель данной работы заключается в проведении анализа данной формулы для определения зависимости погрешности измерения С от величины самого С и в экспериментальном доказательстве полученных результатов. Из приведенной в [1] формулы было получено выражение:

$$\varepsilon_{\text{max}}(s) = \frac{100\left(\frac{P}{Z_p} + 1\right)}{s(2 \cdot f_c \cdot T_{\text{изм}}^{\text{min}} - 1)} - \frac{100}{(2 \cdot f_c \cdot T_{\text{изм}}^{\text{min}} - 1)} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{max}}(\%)$  – максимальная погрешность при измерении С;  $p$  – число пар полюсов;  $Z_p$  – число стержней;  $f_c$  – частота сети [Гц];  $s$  – С. Из выражения (1) видно, что при увеличении скольжения величина погрешности уменьшается. Для подтверждения данного факта были проведены определения погрешностей измерения скольжения на ЭД небольшой мощности при различной нагрузке на валу, а значит и при различных скольжениях.

Результаты экспериментов приведены на рис. 1.



Из графика видно, что с ростом нагрузки на валу ЭД, а значит и с ростом С погрешность  $\varepsilon_{\text{max}}$  уменьшается, что согласуется с формулой (1).

Рис. 1. Зависимость относительной погрешности измерения скольжения от нагрузки  $P_n$

### Литература

1. Филатов А.Н., Скоробогатов А.А. Определение скольжения по гармоникам тока статора с применением цифровой обработки сигналов // Тез. докл. XII Междунар. конф. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». – М.: МЭИ, 2006. Т.3. – 480 с.

## **Способ определения технического состояния электроустановки**

В настоящее время износ основных фондов электроэнергетики России достиг 50 % и в ближайшие 10 лет достигнет 70 %.

Новым направлением в развитии системы технического обслуживания и ремонта является разработка подходов, основанных на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации. Поэтому важнейшей задачей эксплуатации различных электроустановок является постепенный переход от системы планово-предупредительных ремонтов на ремонт по техническому состоянию на основе использования результатов диагностики электрооборудования. Для этого необходимо разрабатывать методы и средства получения диагностической информации, а также математические модели оценки технического состояния, позволяющие учесть все факторы, влияющие на износ оборудования в электроустановках.

Вопрос количественной оценки технического состояния и прогнозирования надежности оборудования электроустановки в настоящее время исследован недостаточно полно. В данной ситуации необходима разработка научнообоснованных методов и математических моделей комплексной оценки технического состояния электрооборудования, прогнозирования надежности и предельных сроков службы электрооборудования в зависимости от его наработки и эксплуатационных факторов. Комплексность оценки заключается в определении технического состояния различного электротехнического оборудования конкретной электроустановки по совокупности воздействующих факторов в различных условиях и режимах работы.

Основными характеристиками технического состояния и надежности оборудования являются свойства безотказности и долговечности. Безотказность определяют следующие показатели: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, параметр потока отказов и средняя наработка до отказа. Долговечность характеризуют показатели среднего ресурса, гамма-процентного ресурса, назначенного ресурса и среднего срока службы.

В работе рассматриваются методы и модели оценки значений показателей вероятности безотказной работы и ресурса электрооборудования как интегральных характеристик уровня технического состояния.

Целью данной работы является разработка методов и математических моделей комплексной оценки технического состояния электроустановки при действии нескольких эксплуатационных факторов в различных режимах эксплуатации.

УДК 621.311.01

А.Л. КУЛИКОВ, к.т.н., к.э.н., Д.М. КУДРЯВЦЕВ, инженер, А.А. ПЕТРУХИН, инженер  
(филиал ОАО «ФСК ЕЭС» Нижегородское ПМЭС)

## **Экспериментальные исследования возможности дистанционного контроля подвесной и натяжной изоляции линий электропередач**

Одним из основных критериев при оценке условий работы изоляторов являются токи утечки по гирляндам, которые увеличиваются в условиях загрязнения, в туманную погоду и т.п., а также изменяются при наличии в гирлянде поврежденных изоляторов.

Наиболее распространенными являются акустические методы определения состояния изоляции, используемые при обходах и основанные на фиксации коронных (частичных) разрядов (ЧР) в акустическом диапазоне частот (например, прибор УД-8). Также распространены электронно-оптические методы, используемые при обходах и основанные на визуализации ЧР (например, прибор Филин). Радиочастотные методы определения состояния изоляции, основанные на фиксации частичных разрядов (ЧР) в электромагнитном частотном диапазоне, не нашли применения в виду неселективности и неоднозначности при работе приемника. Недостатками перечисленных дистанционных методов является затрудненный или невозможный контроль изоляции в местах пересечений ЛЭП, скопления энергетических и других объектов, а также в труднодоступных по условию прохождения для обхода трассы местах.

Авторами предпринята попытка исследования возможности дистанционного контроля технического состояния подвесной и натяжной изоляции ЛЭП с подстанций через ВЧ присоединение на основе регистрации широкополосных параметров токов утечек через изоляцию. В качестве преимуществ исследуемого метода можно выделить: отсутствие обхода трассы ЛЭП, постоянный контроль технического состояния изоляции ЛЭП в режиме реального времени.

В качестве объекта исследований был проимитирован участок ЛЭП с подвесной гирляндой изоляторов ПС-120 в количестве 14 штук, соответствующей напряжению 220 кВ.

Проведенные эксперименты, результаты моделирования и обработки характеризуют потенциальные возможности по определению, классификации и измерению характеристик повреждений изоляции ЛЭП. Применение активного зондирования, пассивных широкополосных измерений или многомерной обработки параметров токов утечки через изоляцию ЛЭП позволит реализовать оперативный (в режиме реального времени) дистанционный контроль.

УДК 621.311.01

А.Л. КУЛИКОВ, к.т.н., к.э.н., Д.М. КУДРЯВЦЕВ, инженер, А.А. ПЕТРУХИН, инженер  
(филиал ОАО «ФСК ЕЭС» Нижегородское ПМЭС)

## **Анализ чувствительности методов диагностики на активном зондировании к измерениям параметров ЛЭП**

Дистанционное определение мест повреждений на линиях электропередач – сложная и актуальная задача, решение которой позволяет оценить время, в течение которого линия может находиться в рабочем состоянии с выявленным повреждением до вывода в ремонт, а также существенно сократить время нахождения линии в ремонте после ее аварийного отключения. Эта задача решается с помощью различных способов, описанных в ряде работ отечественных и зарубежных специалистов

ЛЭП являются одними из самых повреждаемых элементов. В схеме линий электропередач, как правило, предусмотрены специальные приборы, определяющие место повреждения (ОМП), точность которых зависит от длины линии и составляет 5-15 % и более. Методы определения мест повреждений обычно сводятся к определению места короткого замыкания (ОМКЗ). Однако довольно часто возникают повреждения ЛЭП без замыкания, которые сопровождаются увеличенными токами утечек. Повышенные токи утечки вызваны разрядами в воздушном промежутке, например, при нарушении габаритов фазных проводов, при низовых пожарах под ЛЭП, ударах молнии в ЛЭП и др. Актуальным является исследование чувствительных методов по отношению к КЗ – методов обнаружения угроз повреждений, связанных с нарушениями воздушной изоляции.

В работе проводится определение чувствительности к нарушениям изоляции ЛЭП на опытах различных видов коротких замыканий. Исследования по определению чувствительности к нарушению изоляции «провод-земля» проводились по разработанной авторами программе. Применялось высокочастотное излучение в ЛЭП, которая была выведена в ремонт. Имитировался 31 вид короткого замыкания: однофазное, двухфазное и трехфазное металлические короткие замыкания; 9 видов неметаллических однофазных коротких замыканий на каждой фазе; а также проводилось измерение в отсутствии искусственного нарушения изоляции «провод-земля».

Экспериментальные исследования позволили оценить чувствительность при обнаружении нарушений габаритных расстояний, угроз от ДКР и низовых пожаров, определять расстояния до мест транспозиции и пересечения ЛЭП и др. Особенностью однофазной регистрации при активном зондировании является возможность выявления угроз повреждений соседних фаз.

УДК 621.316.062

Д.А. АНДРЕЕВ, к.т.н., ассистент, И.А. НАЗАРЫЧЕВ, студент, И.Н. СУЛЫНЕНКОВ,  
Н.Н. БРЕЗГИНОВ, аспирант  
(ИГЭУ)

А.В. ЛЕТЯГИН, техн. директор  
(«Орелэнерго»)

## **Разработка автоматизированной системы управления надежностью электроустановок**

В настоящее время на рынке прикладного программного обеспечения в сфере энергетики отсутствует программный продукт, который бы мог в полном масштабе собрать в себе все задачи, связанные с оценкой, контролем и управлением надежностью электроустановок. С учетом новой технической политики в сфере электроэнергетики, в рамках которой государство принимает на себе ответственность только за надежность и безопасность функционирования основных производственных фондов, создание автоматизированной системы управления надежностью электроустановок является важной и актуальной задачей.

В настоящее время существуют два основных направления при анализе надежности электроустановок: схемное и функциональное. Схемный подход связан с анализом структуры электроустановки и взаимосвязи ее элементов. При этом используются данные о показателях надежности отдельных конечных элементов. Функциональный подход к анализу надежности связан непосредственно с определением показателей надежности этих конечных элементов. Разрабатываемая система должна объединить в себе два этих направления, что позволит проводить полномасштабные исследования изменения состояния надежности электроустановок в зависимости от работоспособности отдельных ее элементов. При этом показатели надежности элементов будут определяться в зависимости от их технического состояния и условий эксплуатации, что позволит отследить динамику изменения надежности схемы электроустановки в целом в зависимости от наработки ее конкретных элементов или их групп.

Система имеет базу данных содержащую всю необходимую информацию для оценки, контроля и прогнозирования надежности электроустановок, а также ремонтно-эксплуатационные данные, наличие которых позволяет учитывать в показателях надежности ремонтное состояние отдельных элементов электроустановки.

Дружественный пользователю интерактивный интерфейс позволяет легко задавать схему электроустановки со всеми необходимыми для работы системы параметрами по каждому конечному элементу.

Разработанная система может служить хорошей поддержкой при принятии решений при планировании ремонтов, оперативных переключениях и при планировании развитии электрической сети любых масштабов.

## **Разработка программного комплекса по планированию ремонтов электрооборудования**

Износ основных фондов электрооборудования (ЭО) является одной из важнейших на сегодняшний день проблем энергетики России. В связи с дефицитом денежных средств на замену ЭО, исчерпавшего свой нормативный срок службы, производится продление его срока службы сверх нормативного.

В сложившейся ситуации важнейшим мероприятием обеспечения надежности в электроэнергетике является система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) ЭО. Разработка рациональной системы ТОиР, учитывающей при определении сроков предупредительных ремонтов техническое состояние (ТС) ЭО, является сложной комплексной задачей. Определение ТС ЭО на основе применения методов и средств технической диагностики (ТД) с учетом влияния на ЭО реальных условий и режимов эксплуатации позволяет точнее прогнозировать динамику изменения ТС ЭО и время вывода его в ремонт. Данные мероприятия в конечном итоге повышают надёжность работы ЭО и снижают затраты всех видов ресурсов на его ремонт.

Система ТОиР – это технический и управленческий процесс восстановления работоспособности ЭО. Поэтому общая проблема управления ТОиР ЭО по ТС должна решаться на основе разработки программного комплекса для ее реализации.

Можно выделить следующие особенности данного программного комплекса:

- возможность создания архивов аварий, событий и изменения параметров ТС ЭО во времени;
- средства хранения информации с возможностью ее последующей обработки и просмотра (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных);
- многооконный графический интерфейс;
- средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм, трендов и т. д.;
- средства защиты от несанкционированного доступа в систему.

Разработка ориентирована на обоснованное определение оптимального срока и объема ТОиР ЭО, выбор рациональной стратегии проведения ТОиР, планирование ТОиР ЭО с учетом ТС.

УДК 621.321.925

Н.Б. ИЛЬИЧЕВ, к.т.н., доцент, А.И. КУЛЕШОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

В.А. СЕРОВ, к.т.н., доцент  
(Ивановское РДУ)

## **Формат обмена информацией для электроэнергетических компьютерных программ**

В современных условиях выполнение таких расчетов для электрических сетей, как расчеты установившихся режимов, расчеты токов короткого замыкания, расчеты, связанные с анализом потоков и потерь энергии, расчеты, связанные с анализом устойчивости и т.п. традиционно выполняются с применением компьютерных программ. Для каждого вида расчетов на рынке имеется множество программ. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Совершенно очевидно, что нет никакой необходимости требовать ориентации всех расчетчиков на одну единственную расчетную программу.

В таких условиях решением является создание открытого документированного формата данных, который могли бы поддерживать вновь разрабатываемые и развивающиеся программы. В этом случае для существующих программ могли бы быть написаны программы-конверторы, которые позволили бы старые программы легко интегрировать в единую систему электроэнергетических расчетов.

Создание такого формата не является новым предложением. В 80-е годы центральным диспетчерским управлением был предложен унифицированный формат описания расчетных моделей. В настоящее время многие программы расчетов установившихся режимов и анализа устойчивости поддерживают этот формат, который идентифицируется как формат ЦДУ. В настоящее время формат ЦДУ устарел, так как он базируется на представлении записей на перфокартах. В то же время возможности современных компьютеров и запросы расчетчиков настолько выросли, что описание расчетной модели в виде математического графа, состоящего из узлов и ветвей, не удовлетворяет современным задачам. В описание требуется включить сведения об оборудовании, сведения о графическом представлении схемы. Состав параметров должен быть переменным, расширяемым и адаптируемым под задачи.

Предлагается в качестве технической основы формата обмена электротехнической информацией принять формат XML – расширенный язык разметки. Достоинства этого формата состоят в следующем. 1) формат является текстовым, документированным. Он может анализироваться стандартными программами операционной системы; 2) описание данных построено на использование идентификаторов, при этом структура позволяет описывать данные со сложной структурой. 3) для разбора формата внутри программ можно использовать стандартное средство операционной системы.

Задача данной работы состоит в создании расширяемого подмножества языка описания данных для электроэнергетических расчетов XML-Energy.

## **Разработка автоматизированного программного комплекса по расчету параметров схемной надежности**

Необходимость расчета параметров схемной надежности (ПСН) возникает в ходе проектирования электрических станций, подстанций, электрических сетей; при планировании ремонтов; при оперативных переклечениях. При проектировании электрических станций, подстанций, электрических сетей одной из важнейших задач является минимизация затрат на сооружение объекта. Она решается на основе поиска оптимума между уровнем схемной надежности и затратами. Основной задачей при планировании ремонтов является определение порядка и сроков вывода электрооборудования в ремонт. При этом необходимо не допустить снижения уровня схемной надежности ниже допустимых пределов, так как это может привести к отключению потребителей и ущербу от недоотпуска электроэнергии. Задача оптимизации ремонтов так же решается на основе оценки ПСН.

В настоящее время разработан ряд методов определения ПСН. Недостатки и проблемы при их использовании:

- большая трудоемкость и огромный объем вычислений для реальной схемы сети;
- недостаточный объем и в ряде случаев отсутствие статистической информации для различных видов и типов электрооборудования;
- в данных методах не учитываются режимы и условия эксплуатации каждой конкретной единицы электрооборудования.

Данные недостатки возможно устранить при использовании средств современной вычислительной техники и методики расчета ПСН, скорректированной с учетом режимов и условий эксплуатации каждой конкретной единицы электрооборудования.

На кафедре «Электрические станции и диагностика электрооборудования» под руководством д.т.н., профессора А.Н. Назарычева разрабатывается автоматизированный программный комплекс (АПК) по расчету ПСН. Основные этапы создания АПК:

1. Создание векторного редактора для визуализации схемы электрических соединений и разработка графического интерфейса программы.
2. Реализация созданной методики в программном коде.
3. Создание модуля по определению оптимальных схем электрических соединений для нужд проектирования и модуля оптимизации ремонтов электрооборудования.

## Использование информационной системы «Energy» для графического представления информации диспетчеру ОДУ энергосистемы

Энергосистема норильского промышленного района (НПР) включает в себя три местных ТЭЦ и две удалённых ГЭС. В настоящее время для сбора данных в ОДС НПР используется система телемеханики, централизованное хранение данных осуществляется с помощью СУБД MSSQL. Ограниченный объём исходных данных датчиков телемеханики и телеизмерения, не даёт полную картину событий энергосистемы.

В результате была разработана информационная система «Energy» [1]. Особенностью данной системы является определение требуемой информации на базе регистрируемых данных для представительной общей картины происходящих процессов в энергосистеме. Параметры имеют степень свободы регулирования для выбора режимов (отключение/включение, регулирование режимов объектов и т.д.). В системе предусмотрены режимы мониторинга в реальном режиме времени и ретроспективного анализа из архива СУБД. При отсутствии соединения с базой данных система функционирует в режиме тренажёра диспетчерского персонала. Использование математической модели [2] совместно с логической структурой описания энергосистемы [3] позволяет определить недостающие данные.

В настоящее время система используется:

- в качестве системы мониторинга в ОДУ ОАО «НТЭК»;
- в качестве тренажёра при подготовке эксплуатационного персонала энергосистем в отраслевом учебно-тренировочном центре;
- для расчёта установившихся режимов энергосистем;
- определение потерь мощности и экономических затрат по управлению режимами сети;
- в учебном процессе НИИ для студентов специальности «Информационные системы и технологии (в энергетике)».

### Литература

1. **Мыльников В.А.**, Витус В.В. Графическая интерпретация информации, предоставляемая диспетчеру ОДС энергосистемы / Мат-лы XII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново, 2006. – С. 574-577.
2. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

3. **Мыльников В.А.** Информационные технологии создания логической модели электроэнергетической системы / Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново, 2005. – С. 682-685.

## Расчеты токов короткого замыкания для выбора оборудования в программном комплексе «Энергия»

При проектировании систем электроснабжения возникает задача проверки оборудования по термической и динамической стойкости. Для оценки термической и динамической стойкости оборудования, а так же для оценки отключающей способности коммутационных аппаратов приходится выполнять расчеты мгновенных значений токов короткого замыкания. При моделировании полного электромагнитного процесса понадобится множество дополнительных исходных данных об оборудовании, которые очень проблематично получить при проектировании. Их поиск существенно повышает трудозатраты.

Предлагается приближенное решение такой задачи в следующей последовательности.

1. Выполняется расчет начального тока короткого замыкания при моделировании схемы с учетом активных и реактивных сопротивлений и с учетом фазных углов ЭДС.
2. Для заданной точки короткого замыкания рассматриваются токи во всех генераторах (и синхронных и асинхронных двигателях) и выделяются те, ток которых больше номинального более чем в 2 раза. Токи остальных генераторов не выделяются и относятся к подпитке от системы.
3. Для каждого выделенного генератора определяется эквивалентное комплексное сопротивление так, как будь-то, этот генератор один связан с точкой КЗ. Это сопротивление используется для расчета постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ от этого генератора.
4. Для каждого выделенного генератора определяются мгновенные значения апериодической составляющей тока  $i_{a t}$  с шагом 1 мс.
5. Для каждого генератора определяется мгновенное значение тока периодической составляющей  $i_{\pi t}$ .
6. В точке короткого замыкания вычисляется суммарный мгновенный ток, для каждого рассчитанного мгновения времени от всех генераторов и неизменяющееся значение тока от системы. При этом ударный ток получается как наибольшее мгновенное значение.
7. Расчет интеграла Джоуля выполняется путем численного интегрирования
8. На основе интеграла Джоуля вычисляются производные величины, используемые для оценки термической стойкости оборудования и проверки невозгорания кабелей.

Приведенный алгоритм позволяет получить результаты расчетов токов изменяющихся во времени с точностью не хуже реализуемой при ручном расчете, которой вполне достаточно для принятия проектных решений.

## Об одной неточности «Межотраслевых правил по охране труда»

Как известно [1], вредность воздействия электромагнитного поля определяется потребленной телом человека электромагнитной энергией (а не напряженностью электрического или магнитного поля).

Удельная энергия в единице объема электромагнитного поля от магнитной напряженности есть:

$$\mu \frac{H^2}{2} \left[ \frac{ВАс}{М^3} \right]$$

где  $\mu$  – полная магнитная проницаемость воздуха;  $H$  – напряженность магнитного поля  $\left[ \frac{А}{М} \right]$ .

Из приведенной формулы следует, что при увеличении напряженности магнитного поля в 5 раз (400 против 80) (табл.4-1) [2] вредность воздействия возрастает в 25 раз и, следовательно, допустимое время пребывания в поле должна быть сокращена не в 2 раза, а в 25 раз. И далее неточности во всей таблице 4-1 [2].

### Литература

1. **Князевский Б.А.** Охрана труда в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Межотраслевые** правила по охране труда (правила безопасности при эксплуатации электроустановок). – Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

## СЕКЦИЯ 5. ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

УДК 621.311

А.В. МОШКАРИН, д.т.н., Ю.В. МЕЛЬНИКОВ, аспирант, М.А. КОРОТКОВ, студент (ИГЭУ)

### Анализ вариантов реконструкции блока 300 МВт в ПГУ

Для сравнительного анализа вариантов реконструкции энергоблока К-300-23,5 в парогазовую установку с сохранением существующей паровой турбины выбрана наиболее эффективная схема утилизационных конденсационной трехконтурной ПГУ, скомпонированной в виде трехвального дубль-блока (2хГТУ + 2хКУ + 1хПТУ).

В расчетах были использованы ГТУ четырех зарубежных производителей примерно одной и той же мощности (см. табл.).

Таблица 1. Характеристики выбранных для расчетов ГТУ

Вариант	Марка ГТУ	Производитель	Параметры работы ГТУ в условиях ISO 2314			
			Мощность, МВт	КПД, %	Расход газов, кг/с	Температура газов на выходе, °С
а	SGT5-4000F	Siemens	265	38,5	645	581
б	GT26	Alstom	265	38,2	561,6	640
в	PG9351(FA)	General Electric	255,6	36,5	624	609
г	701F	Mitsubishi	270,3	38,2	651	585,8

Считалось, что турбина К-300-23,5 переводится на работу с критическими параметрами пара. Принималось, что давления пара в контурах котла-утилизатора равны 16, 2,75 и 0,25 МПа, а температура острого пара и пара промперегрева – 540 / 540°С. Значения внутренних относительных КПД отсеков турбины оценивались по величине объемных пропусков пара. Результаты расчетного анализа показали, что наибольшей тепловой экономичностью обладает блок с газовой турбиной 701F (Mitsubishi), наименьшей с ГТУ PG9351(FA) (General Electric) (см. табл.2). Варианты блоков с ГТУ SGT5-4000F и GT26 практически одинаковы по экономичности, но для переменных режимов работы блока турбина GT26 предпочтительней, так как имеет более высокую температуру на выходе, а, следовательно, обеспечит требуемую температуру перегрева пара.

Таблица 2. Энергетические характеристики ПГУ-энергоблоков

Вариант газовой турбины	а	б	в	г
Температура уходящих газов за КУ, °С	93,8	86,4	90,3	93,2
Мощность ПТУ (брутто), МВт	250,5	255,2	261,9	256,3
Мощность ПГУ (нетто), МВт	776,5	780,8	768,8	792,8
КПД энергоблока (нетто), %	56,4	56,3	54,9	56,1

УДК 621.311

В.Д. БУРОВ, к.т.н., доцент, А.А. ДУДОЛИН, к.т.н., с.н.с., В.Ф. КАСИЛОВ, к.т.н., доцент,  
(МЭИ (ТУ))  
М.А. СОКОЛОВА, к.т.н., Т.В. ЛИПАТОВ  
(ОАО «ОГК-5»)

## Исследование вариантов расширения Конаковской ГРЭС

Конаковская ГРЭС – одна из крупнейших тепловых электростанций РФ установленной мощностью 2400 МВт. Из-за длительного периода эксплуатации основные фонды электростанции крайне изношены и требуют замещения строительством и вводом новых мощностей от 400 до 800 МВт, с учетом поэтапной модернизации основного оборудования. В силу этого в работе были рассмотрены следующие варианты техперевооружения ГРЭС:

Вариант 1 – новый моноблок ПГУ мощностью 400 МВт;

Вариант 2 – новый дубльблок ПГУ мощностью 800 МВт;

Вариант 3 – надстройка турбины К-300-240 двумя модулями ГТУ+КУ.

Все схемы реализованы на базе ГТУ типа SGT5-4000F фирмы Сименс с КУ трех давлений. Результаты расчета вариантов реконструкции представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Основные показатели вариантов реконструкции**

№ п/п	Наименование:	Вариант реконструкции		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	Номинальная электрическая мощность, МВт	423,2	847,5	825
2	Годовая выработка электроэнергии, тыс. МВт·ч	2962,4	5932,5	5775,0
3	Расход электроэнергии на собственные нужды, тыс. МВт·ч	63,75	127,5	150
4	Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, г/кВт·ч	215,9	215,7	220,07

Приведенный анализ проектных и расчетных оценок по техническому перевооружению энергоблоков с паровыми турбинами К-300-23,5 на основе схем парогазовых установок свидетельствуют о принципиальной возможности их реализации. Однако, существует целый комплекс мероприятий необходимых к проведению при осуществлении данного варианта и более глубокой проработки со стороны производителя существующей ПТУ.

### Литература

1. **Цанев С.В.**, Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.– 584 с.

УДК 621.311

В.Д. БУРОВ, к.т.н., доцент, Е.В. МАКАРЕВИЧ, соискатель  
(МЭИ (ТУ))  
М.А. СОКОЛОВА, к.т.н., Т.В. ЛИПАТОВ  
(ОАО «ОГК-5»)

## Строительство собственных энергоисточников в небольших городах Московской области

Многие города Московской области не имеют собственных энергоисточников для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Основу энергоснабжения потребителей составляют по тепловой энергии, как правило, локальные существующие котельные, по электрической энергии – энергосистема Московской области, т.е. имеет место раздельное производство тепловой и электрической энергии.

Часть из существующих котельных работает на грани выработки паркового ресурса оборудования, по некоторым позициям наблюдается 100% износ, средний срок эксплуатации значительно превышает установленный ресурс. В свете этого встает вопрос о замене оборудования, либо продлении его ресурса.

Одним из перспективных путей повышения энергообеспеченности малых городов является строительство новых ТЭЦ на базе парогазовых технологий, которые могут обеспечить такие города не только тепловой, но и электрической энергией. Это позволит отказаться от закупки электроэнергии из энергосистемы и получить значительную экономию средств как за счет продажи избыточной мощности, также за счет экономии топлива в комбинированном цикле. В работе были рассмотрены два возможных варианта строительства ПГУ-ТЭЦ.

**Вариант 1.** Два моноблока, каждый блок включает в себя ГТУ типа SGT-800 с генератором мощностью около 50 МВт + КУ двух давлений + ПТУ с генератором мощностью около 20 МВт;

**Вариант 2.** Два дубль-блока, в состав каждого из которых входят две ГТУ типа LM2500+ с генератором мощностью около 30 МВт + два КУ двух давлений + одна ПТУ с генератором мощностью около 20 МВт.

Результаты расчета вариантов тепловых схем представлены в табл.1.

Таблица 1. Результаты расчета тепловых схем

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Номинальная электрическая мощность, МВт	126	162
Годовая выработка электроэнергии, МВт*ч/год	869 472	1115186
Годовой отпуск электроэнергии, МВт*ч/год	847 735	1091767
Годовой отпуск тепловой энергии, Гкал/год	309 322	309322
Годовой расход условного топлива, т.у.т./год	211 011	277602
Коэффициент использования тепла топлива, %	74,69	67,64
КПД по отпуску электроэнергии, %	62,69	57,62
Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, г/кВт*ч	195,88	213,12
Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг/Гкал	145,75	145,75

УДК 621.311.22.004.69

А.В. МОШКАРИН, д.т.н., профессор, И.В. ОСИПОВ, Ю.В. МЕЛЬНИКОВ, аспирант,  
М.А. СЛАВНЫЙ, студент  
(ИГЭУ)

## **Варианты технического перевооружения Владимирской ТЭЦ на основе ПГУ**

Исследования отечественных авторов и зарубежный опыт показывают, что наиболее рациональным решением является техническое перевооружение ТЭЦ на основе ПГУ с параллельной схемой.

В такой схеме генерируемый в котле-утилизаторе пар требуемых параметров направляется в паровую турбину, частично вытесняя пар энергетического котла. Необходимая часть основного конденсата по байпасному трубопроводу отводится в газовый подогреватель конденсата (ГПК), а для более глубокого охлаждения газов в котле-утилизаторе применен газовый подогреватель сетевой воды (ГПСВ) в контуре с водяным теплообменником (ВВТО), в котором нагревается сетевая вода.

На Владимирской ТЭЦ после демонтажа отслужившей свой срок паровой турбины ПТ-60-12,8 незагруженными остаются два котла БКЗ-210.

Планируемое увеличение тепловой нагрузки к 2015 году составляет 200 Гкал/ч. Установка новой турбины Т-110-12,8, на существующий новый фундамент, ранее планировавшийся под установку турбины ТП-115, и два действующих котла БКЗ-210, позволят на первом этапе перевооружения ТЭЦ обеспечить выработку требуемого количества тепловой энергии, а на втором этапе провести строительство парогазовой надстройки по параллельной схеме в целях повышения экономичности и электрической мощности ТЭЦ.

Парогазовая надстройка может быть выполнена с несколькими вариантами использования газовых турбин. Проанализированы три варианта с турбинами V94.2а, V84.3а и V94.2.

Расчеты показывают, что при комбинированной работе ПГУ с энергетическими котлами и конденсационном режиме работы турбины Т-110-12,8 суммарная мощность по вариантам составит 310, 300 и 279 МВт. При этом работа по циклу ПГУ позволит получать 263,7, 246 и 219 МВт соответственно. В паросиловом цикле при этом будет достигаться мощность 46,3, 54, 60 МВт.

В среднезимнем режиме с тепловой нагрузкой на отборы турбины Т-110, равной 165 Гкал/ч, суммарная мощность в парогазовом цикле составит 244,11, 228,48, 203,15 МВт, а тепловая мощность отборов пара 118,71, 106,38, 100,87 Гкал/ч, а с учетом ВВТО – 179,6, 156,5, 166,2 Гкал/ч. При этом тепловая энергия, вырабатываемая в паросиловом цикле, не превысит 46,39, 58,62, 64,13 Гкал/ч.

УДК 621.438 + 621.311.22.002.5

И.М. ЧУХИН, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## Оптимизация параметров рабочих тел ПГУ с КУ

Цикл парогазовой установки с котлом–утилизатором (ПГУ с КУ) простейший из ПГУ. Однако выбор оптимальных параметров рабочих тел этого цикла: степени сжатия воздуха в компрессоре газотурбинной установки (ГТУ)  $v$ , давления  $p_0$  и температуры  $t_0$  пара перед паротурбинной установкой (ПТУ), существенно отличается от выбора аналогичных параметров, автономно работающих ГТУ и ПТУ.

В данной публикации представлен пример выбора оптимальных параметров ПГУ с КУ на базе ГТУ с температурой газов перед турбиной 1500 °С. В табл. приведены значения удельной работы  $I_{ГТУ}$  и КПД  $\eta_{ГТУ}$  автономно работающей ГТУ и  $I_{ПГУ}$ ,  $\eta_{ПГУ}$  ПГУ с КУ при различных значениях степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ .

Таблица. Зависимость КПД и работы ГТУ и ПГУ от  $v$ 

В-на	Автономная ГТУ				ПГУ с КУ				
	11	12	27	28	9	10	11	12	13
$v$									
$I_{ГТУ}$ , $I_{ПГУ}$ , кДж/кг	386	386,7	347	340	3376	3405	3422	3425	3422
$\eta_{ГТУ}$ , $\eta_{ПГУ}$	0,34	0,346	0,3747	0,3746	0,55	0,551	0,552	0,551	0,55

Результаты расчетов, приведенные в таблице, указывают на существенное отличие оптимальных значений  $v$  у ГТУ и ПГУ. Для автономной ГТУ  $v_{\text{опт}}$  находится в диапазоне  $12 \div 27$ , а для ПГУ  $v_{\text{опт}} = 10 \div 12$ . В данных расчетах параметры ПТУ для ПГУ с КУ выбирались с оптимизацией давления  $p_0$  и температуры  $t_0$  пара и учетом допустимой степени сухости пара на выходе из ПТУ ( $x_{\text{к,доп.}}=0,88$ ). При этом, если не учитывать  $x_{\text{к,доп.}}$ , оптимальные значения  $p_0$  будут больше по сравнению с учетом  $x_{\text{к,доп.}}$ , и КПД ПГУ с КУ возрастет, а  $v_{\text{опт}}$  наоборот сместится в область меньших значений.

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

- оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре ПГУ с КУ меньше, чем у аналогичной автономной ГТУ;
- оптимальное давление пара перед паровой турбиной ( $p_0$ ) у ПГУ с КУ находится в области больших значений, чем требует  $x_{\text{к,доп.}}=0,88$ ;
- для увеличения КПД ПГУ с КУ целесообразно использовать цикл ПТУ с вторичным перегревом пара или цикл двух давлений.

### Литература

1. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.

## Расчет тепловых схем гибридных установок

Высокотемпературные топливные элементы на основе твердооксидного электролита имеют высокий потенциал газов на выходе. Это тепло целесообразно использовать в газотурбинных установках для выработки дополнительной электроэнергии. Полученную таким способом совмещенную установку называют гибридной. Электрический КПД гибридных станций (ГибЭС) в перспективе может достигать 75 % на природном газе, а в существующих до 53 %, при мощности до 300 кВт [1].

Тепловая схема ГибЭС, как правило, подразумевает наличие рекуператоров для подогрева сжатого воздуха. Следовательно, расчет таких схем аналогичен расчету газотурбинных установок (ГТУ) с регенерацией, только электрохимический генератор (ЭХГ) заменяет камеру сгорания ГТУ (рис. 1). Тепло, подаваемая на газовую турбину (ГТ) состоит из двух составляющих. Первая – это побочный нагрев газов при течении электрохимической реакции в топливных элементах (ТЭ). Вторая – в ТЭ нецелесообразно использовать не все топливо из-за специфики протекаемых реакций, поэтому часть топлива (порядка 15-20 %) остается и дожигается после ЭХГ, выделяя при этом дополнительное тепло. Однако специфика этого оборудования накладывает ограничения на расчет тепловой схемы ГибЭС: необходимо поддерживать тепловой режим работы электрохимического генератора (ЭХГ) для нормального протекания электрохимических процессов, т.е. сохранять постоянной температуру на выходе из ЭХГ, меняя температуру на его входе. Каждый топливный элемент имеет свою вольтамперную характеристику (ВАХ) и в соответствии с ней идет работа ЭХГ в различных режимах (нагрузках). В каждой точке ВАХ количество выделяемого тепла в топливном элементе различно, поэтому в разных режимах необходимо подбирать требуемые параметры установки.

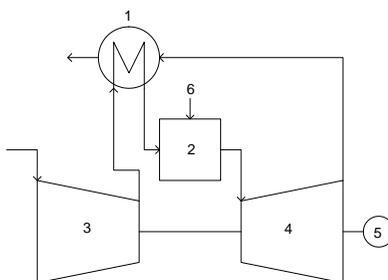


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ГибЭС: 1 – рекуператор; 2 – ЭХГ; 3 - компрессор; 4 – газовая турбина; 5 - генератор; 6 – подача топлива.

### Литература

1. Edited by S.C. Singhal, K. Kendall. «High-temperature solid oxide fuel cell: fundamentals, design and applications». Imprint: Elsevier advanced technology. 2003. С. 363-386.

## **Парогазовые установки на угле – перспективное и экологически чистое решение**

Паротурбинные ТЭС на угле, безусловно, способствуют экономии углеводородного топлива (УВТ), но отличаются низкой тепловой экономичностью и экологическим несовершенством.

Повысить КПД ПТТЭС можно путем применения суперсверхкритических параметров и многократного промперегрева, в том числе с промконтуром. Экологическую чистоту можно обеспечить ценой обогащения угля, очистки его от колчеданной и органической серы, очистки дымовых газов от золы, окислов серы, азота и канцерогенных веществ. Все это усложняет и удорожает схему, а часто делает проблему неразрешимой.

Существенно проще и эффективнее решаются те же задачи при строительстве парогазовых ТЭС, даже при использовании низкосортного угля:

- ПГТЭС термодинамически совершеннее паротурбинной, позволяют иметь КПД до 50 % и, следовательно, способствует значительной экономии УВТ и снижению выброса в атмосферу парниковых газов;

- ПГТЭС в самой схеме имеет элементы, которые гарантируют экологическую чистоту, например камеры сгорания «кипящего» слоя.

При этом выбросы золы, окислов серы и азота минимальны. Даже при сжигании топлива с серосодержанием 7 % выбросы SO<sub>2</sub> минимальны. В ряде случаев золу щелочных углей можно использовать как сорбент при сжигании кислых углей;

- стоимость такой ТЭС не превышает капиталовложений в ПТТЭС суперсверхкритических параметров (не нужен многократный промперегрев, дешевле трубопроводы, не нужно охлаждать ротор паровой турбины).

В мировой практике применяются ПГУ трех типов: с внутрицикловой газификацией угля, с камерами сгорания «кипящего» слоя, с внутрицикловым пиролизом топлива (если выход летучих большой). В последнем случае в качестве продукции может отпускаться не только электроэнергия и теплота, но и пиролизный газ и кокс.

На кафедре ТЭС ИГЭУ проводятся исследования всех типов ПГУ на угле. Наилучшие показатели у ТЭС с внутрицикловым безокислительным пиролизом угля. Именно такие ТЭС следует строить не только на месте добычи угля, но и в европейской части России как загородные ТЭЦ.

В Ивановской области давно назрела необходимость строительства двух новых ПГТЭЦ такого типа: для г. Иванова (ТЭЦ-4) и ТЭЦ для г.г. Кинешмы, Вичуги и Заволжска – одну на три города.

## **Почему Швеция хочет отказаться от угольных и углеводородных ТЭС?**

Использование в качестве энергоносителя для производства тепловой и электрической энергии органического и ядерного топлива определяется безвыходностью страны. Следует помнить, что человечество веками развивалось, имея в своем арсенале лишь энергию Солнца и мускульную силу животных, то есть тоже преобразованную энергию Солнца. В дальнейшем человечество научилось использовать гидравлическую энергию рек и морских приливов, энергию ветра, геотермальную энергию.

Следующим шагом в цивилизации было сжигание топлива. Первоначально люди не понимали всех последствий, связанных со сжиганием: уничтожаются невозобновляемые ресурсы, загрязняется атмосфера, происходит тепловой разогрев среды обитания. Именно на этом этапе стали строиться тепловые и атомные электростанции. Поскольку недоплатка в топливе не было, такое направление в энергетике считалось приемлемым. Различные термодинамические совершенствования позволили поднять КПД до 52-60 %.

Постепенно пришло сознание того, что сжигание топлива является своего рода преступлением. Ущерб, причиняемый природе, нередко превышал эффект от энергетического производства. Осознание этого раньше всех осенило Швецию с её 8-ми миллионным населением. Первым этапом был отказ от атомных электростанций: построенные АЭС были переделаны в газовые ПГУ, вместо новых АЭС сооружены угольные ПГУ.

Вторым шагом является запланированный отказ от использования органического топлива. Вместо ТЭС и АЭС шведы разрабатывают ветряные, солнечные и даже фотоэлектрические станции. Повышается доля малых ГЭС. Налицо забота о сохранении природной среды обитания и о будущих поколениях. Можно предположить, что следующим этапом будет замена газовых кухонных плит на электрические или солнечные. Таким образом, отказ Швеции от ТЭС и АЭС в пользу возобновляемых источников энергии является важным практическим шагом в деле энергосбережения и сохранения природы.

Подходит ли нам шведская модель? Я считаю, что мы вполне можем ее заимствовать. Энергия малых рек у нас совсем не используется, приливные электростанции для Севера и, особенно, для Востока ещё не спроектированы, хотя мы располагаем потенциалом в 113 ГВт по мощности и 267 ТВт·ч по годовой выработке только по приливной энергии, а что касается ветряных и солнечных станций, то здесь условия у России и Швеции одинаковые. Не грех и поучиться. При условии, что газом и нефтью мы торговать больше не будем.

## Новое теплообменное оборудование в энергетике

Развитие технологии производства качественного листового проката, обеспечивающего возможность штамповки профилированных пластин, позволило многим отечественным и зарубежным фирмам наладить производство теплообменных пластин для теплообменных аппаратов. На сегодняшний день на ряде генерирующих предприятий ПАО «ЕЭС России» введены в работу пластинчатые теплообменники различных фирм. Накоплен опыт их работы при выполнении различных технологических задач.

Преимущества пластинчатых теплообменников, заключается в их способности повысить эффективность работы тепловой схемы станции за счет снижения величины недогрева до 1-2 °С. Для традиционных кожухотрубных теплообменников эта величина даже в лучших случаях составляет 3-5 °С. Отмеченное снижение величины недогрева в поверхностных подогревателях реальной регенеративной схемы подогрева питательной воды, как показывают расчеты, сулит возможность относительного увеличения КПД блока до 0,5 %. Теоретически это возможно, но на практике выяснилось, что пластинчатые теплообменники весьма чувствительны к наличию различных примесей в воде, особенно к органическим соединениям. Поэтому реконструкции и замена кожухотрубных теплообменников на пластинчатые должна проводиться на основе тщательного анализа системы водоподготовки и водного режима. В отдельных случаях может потребоваться одновременная модернизация и системы водоподготовки. В противном случае ожидаемая дополнительная экономия денежных средств от замены теплообменников будет невозможна из-за сокращения межремонтных периодов. Именно это показал опыт эксплуатации пластинчатых теплообменников на ТЭЦ-25 ОАО «Мосэнерго» в системе маслоохлаждения циркуляционной водой из градирни.

При выполнении ТЭО проекта с применением пластинчатых теплообменников необходимо оценивать затраты на проведение ремонтных работ. В расходные статьи также рекомендуется включать затраты на замену профилирующих уплотнений теплообменников, поскольку они могут составлять от 10 до 30 % первоначальной стоимости самого теплообменника, а срок их службы ограничен и зависит от ряда эксплуатационных факторов.

### Литература

1. **Протокол** заседания секции «Технология строительства и монтажа» НТС ПАО «ЕЭС России» №13 от 14.03.2006 года.
2. **Гельперин Н.И.** Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

## **Влияние применения пластинчатых теплообменников на работу тепловой схемы турбоустановки Т-250/300-23,5**

Теплообменники пластинчатого типа являются принципиально новыми по конструкции в сравнении с традиционными кожухотрубными и в настоящее время активно внедряются в энергетике при модернизации оборудования вместо последних. Главные преимущества пластинчатых теплообменников (ПТО) – это их высокая тепловая эффективность, компактность, надежность и простота в работе, а также маневренность. В ОАО Мосэнерго уже накоплен некоторый опыт применения ПТО в отдельных тепловых схемах некоторых ТЭЦ. В докладе приводятся результаты исследования применения их в системе регенеративного подогрева питательной воды турбоустановки Т-250/300-23,5.

В рассматриваемой схеме первый по ходу основного конденсата подогреватель низкого давления (ПНД-1) работает с большим температурным напором и при больших расходах нагреваемой среды через него требуемое количество греющего пара очень мало. В таких условиях подогрев основного конденсата в нем практически не осуществляется, что ставит вопрос о целесообразности его применения. Некоторые ТЭЦ ОАО Мосэнерго уже внесли изменения в тепловые схемы этих блоков, полностью отказавшись от ПНД-1. Исследование, основанное на режимных показателях блока №8 ТЭЦ-23 ОАО Мосэнерго, показывает следующие результаты установки ПТО в качестве ПНД-1.

Происходит перераспределение потоков пара в последних регенеративных отборах турбины: в ПНД-1 расход греющего пара увеличивается, а в следующий за ним (ПНД-2) – уменьшается. Греющий пар в ПНД-1 поступает после его расширения в проточной части цилиндра низкого давления (ЦНД) турбины, что способствует дополнительной выработке турбиной электрической мощности. ПТО обладает меньшим по сравнению с кожухотрубным теплообменником гидравлическим сопротивлением, что в свою очередь уменьшит затраты собственных нужд на прокачку основного конденсата через него. Вместе эти изменения дадут небольшое увеличение отпускаемой мощности (около 60 кВт) при тех же затратах.

Главное же преимущество этой схемы заключается в том, что улучшаются условия эксплуатации самой турбоустановки. Увеличение пропуска пара в цилиндр низкого давления создает хорошие условия обтекания им рабочих лопаток последней ступени. Это будет способствовать уменьшению возможности корневого отрыва потока пара с содержащейся в нем влагой с возникновением вихревых течений, тем самым снижается эрозионный износ этих лопаток, а также потери в турбине, связанные с вентиляцией пара.

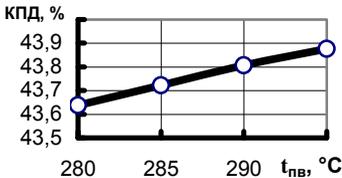
УДК 621.321

Е.В. ДОРОХОВ, к.т.н., доцент, И.Ш. ЗАГРЕТДИНОВ, инженер,  
А.С. СЕДЛОВ, д.т.н., профессор, А.П. РЫКОВ, к.т.н., доцент  
(МЭИ (ТУ))

## Расчетные исследования параметров тепловой схемы энергоблока с двумя промежуточными перегревами при давлении свежего пара 27 МПа

Выполнены расчетные исследования тепловой схемы энергоблока мощностью 330 МВт с двумя промежуточными перегревами пара. Параметры свежего пара 27 МПа и 580°C. Температура пара перед ЦСД-1 580, а перед ЦСД-2 – 560°C. В состав тепловой схемы включена блочная испарительная установка. ПВД включены по схеме Виолен.

При затратах на собственные нужды 4,2 % КПД нетто энергоблока показан на рисунке в зависимости от температуры питательной воды. КПД брутто котла принят равным 93,6 %. Принята длина рабочих лопаток последней ступени 1000 мм. При этом достаточно одного двухпоточного ЦНД. Пар на приводную турбину питательного насоса второго подъема отбирается из выхлопа ЦСД-2 с давлением 1,03 МПа, что позволяет при незначительной реконструкции применить серийную приводную турбину.



При температуре питательной воды 280°C давление первого промперегрева не должно превышать 5 МПа.

В схеме с двумя промежуточными перегревами расход питательной воды снижается примерно на 9,3 % по сравнению со схемой с одним промперегревом. Поэтому меньше необходимые диаметры трубопроводов питательной воды и свежего пара. Удельный расход теплоты турбоустановкой снижается на 81 кДж/кг, а КПД энергоблока повышается на 0,47 %.

Низкая влажность в последней ступени, 4 %, снижает действие факторов, вызывающих эрозию рабочих лопаток. Не требуется создание в проточной части ЦНД устройств периферийного и внутриканального влагоудаления.

При повышении параметров свежего пара и температуры питательной воды прирост КПД достигает 0,98 % по сравнению со схемой с одним промперегревом.

УДК 621.311

И.В. ШЕРСТОБИТОВ, к.т.н., доцент, А.В. МИРОНЕНКО, инженер,  
А.С. ЛЯШОВ, аспирант  
(КГТУ, филиал «Невинномысская ГРЭС» ОАО «ОГК-5»)

## **К вопросу определения технического минимума энергоблока с турбиной К-160-130**

Особенностью работы энергоблока с турбиной К-160-130 на Невинномысской ГРЭС является использование в системе регенерации пара из противодавления турбины Р-50-130/13. Результатом работы турбоустановок по такой схеме является увеличение электрической мощности противодавленческой турбины при пониженных тепловых нагрузках внешних потребителей. Пар из противодавления турбины Р подается в регенеративный подогреватель ПВД-7, что уменьшает потери от необратимости процесса теплообмена в системе регенерации турбины К-160-130. При этом минимум нагрузки энергоблока с турбиной К-160-130, определяемый условием надежной работы парогенератора и питательного насоса, увеличится. Прирост электрической мощности турбины блока обусловлен увеличением пропуска пара в части среднего и низкого давлений турбины К-160-130.

В результате проведения соответствующих расчетов, в которых за исходные данные были приняты фактические рабочие параметры блоков Невинномысской ГРЭС, было установлено, что прирост электрической мощности блока (паровой котел ТГМ-94, турбина К-160-130), при работе по совместной схеме, составляет 1,9 МВт. Таким образом, технический минимум блока увеличился на 2,64 % и составил 70,356 МВт.

### **Литература**

1. **Гиршфельд В.Я.**, Князев А.М., Куликов В.Е. Режимы работы и эксплуатация ТЭС. – М.: Энергия, 1980.
2. **Шляхин П.Н., Бершанский М.Л.** Краткий справочник по турбинным установкам. – М.: Энергия, 1970.
3. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции – М.-Л.: Энергия, 1967.

УДК 621.165

А.А. ИВАНОВСКИЙ, аспирант, В.Л. ПОХОРИЛЕР, к.т.н., профессор  
(УГТУ-УПИ)

## Моделирование прогрева высокотемпературных узлов паровых турбин при пусках из холодного состояния

Проведены подробные расчетные исследования температурного и термонапряженного состояния роторов, корпусов стопорных клапанов и корпусов ЦВД турбин Т-110/120-130 и Т-250/300-240. Расчеты выполнялись методом конечных элементов на основе двухмерных и трехмерных моделей, которые были построены в соответствии с реальными геометрическими размерами и с учетом максимально возможного количества концентраторов напряжений, таких как тепловые канавки и придисковые галтели в роторах и различные проточки в корпусах цилиндров и стопорных клапанов.

На первом этапе расчетного исследования для всех «критических элементов» решалась задача нестационарной теплопроводности при переменных во времени граничных условиях III рода. Температуры пара задавались в соответствии с инструкциями по пускам и на основании экспериментальных данных. Коэффициенты теплоотдачи определялись в соответствии с руководящими материалами по моделированию температурных полей [1]. В случаях, когда данные по теплообмену отсутствовали, как, например, для паровой коробки и фланца стопорного клапана турбины Т-110/120-130, коэффициенты теплоотдачи определялись путем моделирования прогрева стопорного клапана и сопоставления получаемых при этом данных по температурам в контрольных точках с температурами, замеренными в эксперименте [2].

Используемый для расчетов метод конечных элементов позволил получить полное температурное поле исследуемых узлов с учетом их реальной геометрической формы, что позволило получить достаточно полную и точную картину распределения напряжений в различные моменты времени пуска на втором этапе исследования, где температурные поля задавались в качестве нагрузки.

Анализ полных температурных полей и распределения температурных напряжений позволил выделить основные недостатки конструкций, которые наиболее сильно влияют на термонапряженное состояние.

### Литература

1. **РТМ 108.020.16-83.** Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин. – М.: Минэнергомаш, 1983. – 116 с.
2. **Ивановский А.А., Похорилер В.Л.** Определение условий теплообмена в стопорных клапанах турбин УТЗ с давлением свежего пара 12,8 МПа // Труды IV РНКТ. – М.: Издательство МЭИ, 2006. Т. 8. – С.66-68.

УДК 621.311:621.181:662.96

В.Н. ПОТАПОВ, к.т.н., доцент, С.М. ИВАНОВА, Е.Е. КЕЛЛЕР  
(УГТУ-УПИ)

## **Прогноз наиболее перспективных типов энергоблоков для модернизации тепловых электростанций Урала**

Для технологического прорыва и наиболее быстрой модернизации тепловых электростанций (ТЭС) предлагаем два основных типа блоков, схемы которых нами рекомендуются на основе анализа отечественного и зарубежного опыта, а также наших технико-экономических расчетов. На природном газе следует строить только парогазовые блоки (ПГУ) и лишь одного типа – без сжигания в котле-утилизаторе (К-У) в основных режимах. Для удешевления и ускорения внедрения достаточно контура одного, среднего давления, без регенерации на паровой турбине. При использовании газовых турбин с максимальным КПД, нагревом сетевой и подпиточной воды газами после К-У и при отказе от конденсатора за паровой турбиной это, тем не менее, может обеспечить КПД<sub>э</sub> ТЭС 58 %. Использование выхлопов паровых турбин для коммерческого отпуска тепла гарантирует КПД<sub>т</sub> использования топлива в 85-90 %, обеспечивая конкурентоспособность даже на рынках Европейского Союза (ЕС).

Второй тип энергоблоков рекомендуем для мощных угольных ТЭС. Он будет конкурентоспособен на рынке электроэнергии в перспективе развития при мощности не ниже 800-900 МВт<sub>э</sub>. Блоки 200-500 МВт<sub>э</sub> уже почти неконкурентоспособны в ЕС и в США. Причем можно ошибиться при выборе параметров – погоня за ультракритическими давлениями в ближайшие 10-20 лет в условиях России пока преждевременна. Только традиционные сверхкритические давления (СКД) могут гарантировать в перспективе достаточную надежность, умеренные капиталовложения и уже отработанные режимы покрытия диспетчерского графика на рынке электроэнергии. Реальное повышение КПД<sub>э</sub> в 1,5-2 % при отходе от СКД на УКД нижнего уровня существенно удорожает оборудование, понизит его маневренность и надежность. При этом есть отработанные схемы ТЭС на традиционных СКД, которые повышают КПД<sub>э</sub> ТЭС на 4-6 % при более умеренных затратах. Это схемы, разработанные на кафедре ТЭС УГТУ-УПИ, на Подольском котельном заводе и на Deutsche Babcock. Их внедрение позволило немецким энергетикам достичь сегодня лучших в мире экономических и экологических показателей на мощных угольных ТЭС. Их особенность – это котлы с дополнительным параллельным низкотемпературным конвективным газоходом. В них идет нагрев части от всех потоков вод, включая основной конденсат и питательную воду. На охлажденных уходящих газах в мокроизвестняковой сероочистке утилизирует даже часть теплоты конденсации H<sub>2</sub>O дымовых газов. При этом происходит не только почти 100% очистки дымовых газов от золы и оксидов серы, но и от в сотни – тысячи раз более опасных HF и HCl, а также от Hg и Pb. Подобные ТЭС работают вообще без дымовых труб.

УДК 621.165

В.Л. ПОХОРИЛЕР, к.т.н., профессор, А.Ю.КУЛТЫШЕВ, аспирант,  
В.Н. ГОЛОШУМОВА, к.т.н., с.н.с.  
(УГТУ-УПИ)

## Вопросы термонапряженного состояния ротора среднего давления турбины К-300-240-2 при пуске по новой технологии

По причине отсутствия средств регулирования температуры промперегрева на блоках 300МВт Рефтинской ГРЭС, по причине их существенных недостатков [1], в процессе пуска по существующей технологии возникают значительные радиальные разности температур, которые по результатам численного моделирования достигают  $190-220^{\circ}\text{C}$  и соответствующие им температурные напряжения (эквивалентные по Мизесу достигают 470МПа).

В этой связи была разработана и экспериментально проверена усовершенствованная технология [1], по которой разворот ротора турбины и прогрев на частоте до 1200об/мин проходит путем подачи пара от растопочного расширителя блока Р-20. Клапаны ЦВД при этом закрыты и РВД вращается в безрасходном режиме. Температура пара промперегрева регулируется с учетом превышения температуры паровпуска ЦСД в пределах  $100^{\circ}\text{C}$ . Прогрев происходит за счет повышения температуры пара промперегрева на выходе из котла до  $380-420^{\circ}\text{C}$ . Проведено большое число пусков по данной технологии с положительными результатами.

Детальный анализ радиальных разностей температур по результатам моделирования прогрева ротора ЦСД в процессе пуска по новой технологии показал значительно более благоприятное состояние последнего. Радиальные разности температур по ротору достигают  $95-120^{\circ}\text{C}$ . Максимальные эквивалентные температурные напряжения, возникающие на дне тепловых канавок переднего концевое уплотнения, достигают значений  $220-250$  МПа, что более чем в 2 раза меньше предела текучести для используемой стали.

Полученные результаты могут быть положены в основу скорректированной инструкции по пуску.

### Литература

1. **Похорилер В.Л.**, Култышев А.Ю., Грехов Л.Л. Новая технология пуска дублирующих блоков 300 МВт / Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2005. – 1 т. – С.119-120.

УДК 620.9(075)

В.Н. ЗАЙЧИКОВ, соискатель, А.В. МОШКАРИН, д.т.н., Б.Л. ШЕЛЫГИН, к.т.н.  
(ИГЭУ)

## **О целесообразности предварительного нагрева воздуха в котлах ИКЗ**

Водогрейные котлы отопительных котельных не оборудованы воздухоподогревателями. В основном воздух к горелочным устройствам поступает из котельного помещения. Однако в случае низких температур наружного воздуха (менее  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в зоне обслуживания энергоустановки нарушается нормальная климатическая обстановка. Это заставляет использовать в качестве окислителя наружный воздух, что недопустимо по условию устойчивости процесса горения топлива. В противном случае необходимо применение специальных калориферов, что связано с дополнительными материальными затратами.

Для котлов ИКЗ, поверхности нагрева которых изготавливаются из труб  $\varnothing 159 \times 4,5$  мм, отмеченные препятствия устраняются за счет размещения внутри труб последних конвективных экранов труб с внутренним диаметром  $\varnothing 30-80$  мм и пропуска внутри их подаваемого к горелкам воздуха. При этом дополнительно интенсифицируется спиралеобразный характер движения воды с увеличением на 90 % длины стабилизации потока, что снижает накипеобразование внутри поверхностей нагрева водяного тракта.

Расчетное исследование выполнялось применительно к котлу марки КВ-ГМ-2,03 с температурой воды на входе  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При наружной поверхности котла  $37\text{ м}^2$ , потере теплоты  $q_5 = 1,9\%$  тепловыделение в котельном помещении составляет  $0,042\text{ МВт}$ . При этом в случае наружной поверхности котельной  $240\text{ м}^2$  и температуре окружающего воздуха  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура внутри помещения равна  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Наружный воздух перед поступлением в центральные трубы конвективных экранов котла нагревается воздухом котельного помещения до  $3 \div 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При поверхности нагрева встроенного воздухоподогревателя  $11\text{ м}^2$  температура воздуха за ним равна  $11 \div 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За счет снижения температуры уходящих газов на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  КПД котла возрастает на  $0,2\%$ .

При тепловой нагрузке воздухоподогревателя  $0,02\text{ МВт}$  годовая экономия природного газа с теплотой сгорания  $35,8\text{ МДж/м}^3$  по сравнению с вариантом дополнительного использования калориферов для котельной с тремя агрегатами составляет около  $8000\text{ м}^3$ .

Предложенное техническое решение, защищенное патентом РФ на полезную модель, повышает эффективность работы котла ИКЗ в северных федеральных регионах России, а так же улучшает надежность поверхностей нагрева энергоустановки при использовании низкокачественной сетевой воды.

УДК 621.181

Н.Б. КАРНИЦКИЙ, д.т.н., профессор, В.А. ЧИЖ, к.т.н., доцент, А.В. НЕРЕЗЬКО (БНТУ)

## Особенности сжигания лигнина в кипящем слое

Современные теплоэнергетические установки развиваются по пути создания новых технологий топливоиспользования и совершенствования традиционных способов выработки электроэнергии. При этом можно отметить, что органическое топливо в ближайшее время будет доминирующим в топливном балансе страны при увеличении доли твердых и местных видов топлива.

Из местных видов топлива в Беларуси используется органические отходы в виде гидролизного лигнина, получаемого при производстве гидролизного спирта, которые сжигаются в котле Е-30-3.9-440ТФТ с 2005 г. на Бобруйской ТЭЦ-1. Сложность использования лигнина в энергетических котлах состоит в том, что при сушке и механической переработке он взрывоопасен.

Технология такого сжигания заключается в организации газификации топлива в предтопке «кипящего слоя» при температуре 700-850°С. Для растопки и подсветки (поддержания горения основного твердого топлива) используется природный газ либо топочный мазут.

При такой организации горения неизбежен занос поверхностей нагрева золой и инертным материалом, что ухудшает теплообмен и снижает эффективность котлоагрегата. На сегодняшний день полностью не изучены физические и химические свойства зольных отложений на лигнине.

Химический состав отложений характеризует лишь качественную структуру, не затрагивая прочностных свойств.

Как подчеркивается из [1], сведения о фактическом значении и прочности отложений в настоящее время можно получить лишь экспериментальным путем методом прямого сдвига.

Испытания проб на прямой сдвиг производится по методике [2] с использованием модернизированного авторами прибора Дженике с усовершенствованным измерительным устройством. Полученные данные по аутогезионным свойствам отложений позволяют определить скорость заноса экранных труб, способ очистки поверхностей нагрева с оптимальной периодичностью.

### Литература

1. **Зимон А.Д.**, Адрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. – М.: Metallurgy, 1978. – 288 с.
2. **Дженике Э.В.** Складирование и выпуск сыпучих материалов (пер. с англ.) / Под ред. М.И. Агошкова – М.: Мир, 1968. – 164 с.

## Повышение производительности пылесистем при провеивании возврата сепаратора

В 60<sup>х</sup>–70<sup>х</sup> годах прошлого века было выполнено достаточно большое количество работ по повышению производительности пылесистем с шаровыми барабанными мельницами путем организации по схеме 1а провеивания возврата основного сепаратора и подачи выделенного материала в готовую пыль. Основная причина малой эффективности подобных мероприятий заключается в том, что для обеспечения требуемой тонкости готовой пыли классификация в сепараторе провеивания должна проводиться по границе 10-15 мкм, что позволяет увеличить производительность пылесистемы всего лишь на 1-2 %. По этой причине такая схема на практике не применяется.

Нами предлагается организация провеивания возврата по схеме 1б, в которой выделенный в сепараторе провеивания материал подается на вход основного сепаратора. В этом случае дисперсный состав выделенного материала должен быть близок к составу мельничного продукта, что позволяет организовать разделение в сепараторе провеивания по границе 100-150 мкм. Расчеты показывают, что применение схемы 1б увеличит производительность пылесистемы на 14-17 % при сохранении тонкости готовой пыли. Для провеивания возврата основного сепаратора по этой схеме можно использовать гравитационные сепараторы с пересыпными полками, которые обладают высокой эффективностью разделения, просты в изготовлении и легко встраиваются в существующие пылесистемы. Для применения такой схемы необходимо иметь запас в 20-30 % производительности мельничного вентилятора.

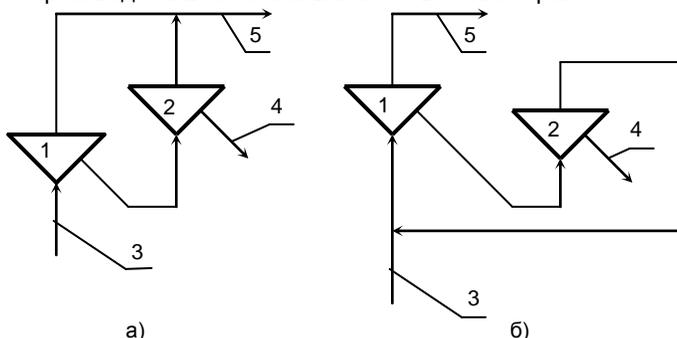


Рис. 1. Схемы провеивания возврата: а – подача материала в готовую пыль; б – на вход основного сепаратора; 1 – основной сепаратор; 2 – сепаратор провеивания; 3 – мельничный продукт; 4 – возврат в мельницу; 5 – готовая пыль

## Ячеечная модель перемещения дисперсного материала ленточным транспортёром

В целом ряде технологических процессов горно-обогатительной, горнодобывающей, строительной и других отраслей промышленности одной из операций является транспорт сыпучего материала на ленте цепного транспортёра. Построение динамических моделей таких процессов требует учета транспортного запаздывания транспортёра и особенностей формирования гранулометрического состава материала на выходе из него. Наибольшие трудности возникают при определении гранулометрического состава материала на выходе из транспортёра в случае, если подача дисперсной среды на ленту каким-либо образом распределена по её длине.

Предложена математическая модель, предполагающая разбиение транспортной линии на  $n$  участков (ячеек). Количество данных ячеек определяется транспортным запаздыванием ленты ( $dt_{\text{тр}}$ ) и величиной интервала времени, через который производится расчёт схемы ( $dt$ ). Время транспортного запаздывания зависит от линейной скорости перемещения ленты и её длины. Интервал времени между операциями расчёта обычно определяется возможностями ПЭВМ.

Для наиболее сложных случаев, когда на транспортёр подаётся материал из нескольких узлов схемы (например, при производстве гранулированных коагулянтов на ленту транспортёра направляется смесь продукта дробления и подрешеточного продукта грохочения) или когда материал рассредоточено поступает на различные участки ленты, гранулометрический состав дисперсной среды в любой ячейке транспортёра рассчитывается по методике, предложенной в докладе.

Поступившая в момент времени  $t$  на транспортёр дисперсная среда заполняет первую ячейку, в которой сохраняется информация о гранулометрическом составе и расходе (массе) поступившего материала в течение времени  $dt$ . В следующий момент времени ( $t+dt$ ) материал из первой ячейки перемещается во вторую. Первая ячейка, в этом случае, заполняется вновь поступившим материалом, характеризующим собственным гранулометрическим составом и расходом. Таким образом, движение материала представляет собой перемещение дисперсной среды из первой ячейки во вторую, из второй в третью и т.д. до  $n$ -й ячейки.

Предложенная математическая модель, позволяет в режиме реального времени отслеживать расходную и гранулометрическую характеристики транспортируемого дисперсного материала, поступающего из различных участков технологической схемы при произвольном распределении входных потоков по длине транспортёрной ленты.

УДК 621.181.662.9

А.В. ЖУЙКОВ, ст. преподаватель, Ю.В. ВИДИН, к.т.н., профессор  
(ПИ СФУ, г. Красноярск)

## **Замена мазута углем на котлах работающих на твердом топливе в нашей стране и за рубежом**

В отечественной и зарубежной практике разрабатываются различные способы поджигания пылевоздушной смеси и экономии мазута и газового топлива для растопки и подсветки факела. Наиболее исследованными способами поджигания пылевоздушной смеси являются следующие:

- с использованием для поджигания жидкого или газообразного топлива;
- с газозлектрическим поджиганием;
- с поджиганием мощной электрической дугой;
- с поджиганием плазматроном;
- с предварительной газификацией топлива.

В зарубежной практике имеются примеры успешного проведения экспериментальных работ по замене растопочного мазута или газообразного топлива углем. При этом в качестве растопочного используется не только рабочее высокорекреакционное топливо, но и отдельное растопочное топливо при работе парогенераторов ТЭС на основном низкорекреакционном топливе.

На одной из ТЭС в Германии на трех парогенераторах блоков 300 МВт замена растопочных мазутных горелок на комбинированные пылеугольные с поджиганием их мазутом позволила сократить расход мазута на одну растопку с 35 до 1 тонны, заменяя его эквивалентным по тепловыделению высокорекреакционным топливом (60 т). Фирма Combustion Engineering (США) разработала растопочную пылеугольную горелку, использующую сухую пыль, которая подается при высокой концентрации и поджигается высоковольтной электрической дугой.

В России разработку растопочных пылеугольных горелок с использованием поджигания пылеугольной смеси высоковольтной дугой, электрозапальным устройством и другими способами ведут многие научные институты. Например, в Красноярском крае безмазутной растопкой занимаются в СибВТИ и ПИ СФУ. К примеру, безмазутная растопка внедрена на Красноярской ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 так же на некоторых других предприятиях края.

### **Литература**

1. **Жуйков А.В.** Некоторые предложения по модернизации безмазутной растопки и подсветки котельных агрегатов на Красноярской ТЭЦ-2 / А.В. Жуйков, Ю.В. Видин // Промышленная энергетика. – 2006. – №3. – С. 20-22.
2. **Жуйков А.В.** Схемы получения, хранения и транспорта угольной пыли для безмазутной растопки и подсветки котлоагрегатов / А.В. Жуйков, Ю.В. Видин // Электрические станции. – 2006. – №4. – С. 2-4.

## Математическая модель преобразования дисперсного состава материала в шаровой барабанной мельнице

Шаровые барабанные мельницы (ШБМ) составляют значительную долю в составе углеразмольного оборудования ТЭС. По своей конструкции они более всего приспособлены для измельчения относительно прочных углей до достаточно мелкой пыли. Вместе с тем за последнее время на ТЭС России стали применяться новые технологии сжигания углей (ВИР-технология, сжигание в кипящем слое), требующие подачу в топочную камеру значительно более крупных частиц. Как правило, внедрение новых технологий базируется на реконструкции уже существующего оборудования. Высокая стоимость мельниц делает экономически целесообразным поиск конструктивных решений и режимов работы пылесистем, обеспечивающих получение пыли с требуемым дисперсным составом, существенно отличающимся от того, на который были первоначально запроектированы пылесистемы.

Реконструкция систем измельчения в первую очередь затрагивает изменение конструкции сепараторов пыли. Метод расчета [1], используемый при проектировании пылесистем с ШБМ, построен на основе аппроксимационных формул, полученных при испытании существующего оборудования. Этот метод предназначен только для оценки максимально достижимой производительности пылесистемы. Он рассматривает мельницу и сепаратор пыли как единый агрегат и поэтому не может дать информации о работе пылесистемы с новым сепаратором или с меньшей производительностью питания.

Существенным отличием ШБМ от мельниц других типов является аккумуляция в размольном пространстве мельницы большого количества измельчаемого материала. По этой причине значительное влияние на формирование условий измельчения оказывает движение материала вдоль барабана мельницы, определяющее время пребывания частиц различных размеров в зоне размола.

Для расчета дисперсного состава пыли на выходе из ШБМ в зависимости от режима работы мельницы предлагается математическая модель, учитывающая совместно протекающие процессы измельчения и перемещения материала в барабане. При работе мельницы в замкнутом цикле с сепаратором эта модель совместно с моделью сепаратора может быть использована для расчета дисперсного состава готовой пыли после сепаратора.

### Литература

1. **Лебедев А.Н.** Подготовка и размол топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 520 с.

УДК 621.9: 621.042: 533.6

В.Н. ПОТАПОВ, к.т.н., доцент, А.А. РУСАНОВСКИЙ, Н.Г. ГАРЯЕВА  
(УГТУ-УПИ)

## **Принципы улучшения конструкций пылеугольных горелок для паровых котлов электростанций**

Пылеугольные горелки для котлов тепловых электростанций (ТЭС), имеющие единичную мощность 10-50 МВт были спроектированы еще 40-60 лет тому назад и не удовлетворяют требованиям экономичности и экологической безопасности сжигания углей основных марок. Многие из них многократно исчерпали свой ресурс и не поддаются управлению и тонкой настройке. Особенно важно хорошее состояние горелок при сжигании достаточно трудных экибастузских углей, имеющих высокую зольность. На ТЭС Урала при сжигании углей используют почти только вихревые горелки. Из них выделим 2 группы: с улиточным (У) регистром закрутки воздуха и с тангенциальными лопаточными регистрами (ТЛ). Для стабилизации горения горелки помимо указанных узлов закрутки воздуха дополнительно используют стабилизаторы горения, главным образом, металлические конусы, размещенные в потоке аэропыли при выходе из горелок. Но эти конусы недолговечны, быстро истираются и оборачивают, что на мощных котлах вызывает даже снижение КПД котлов на 1-2 %, а на малых котлах – еще больше, что заставляет персонал ТЭС переводить котлы на другой вид топлива, что часто невозможно и персонал вынужден даже выводить котел в ремонт. Другой недостаток горелок, это очень сильная неравномерность и несимметричность всех потоков воздуха и аэропыли, формируемых горелкой, особенно в ходе настройки режимов, даже без учета поломок узлов закрутки воздуха.

На основе данных экспериментов и расчетов нами предложен набор простых приемов для модернизации существующих горелок котлов при сохранении базовой аэродинамической схемы. Для горелок, имеющих завихрители воздуха типа ТЛ, предложено дозированное патентованное струйное охлаждение выходных элементов цилиндрических воздушных каналов для продления ресурса и предотвращения коробления привода узла закрутки воздуха. Установленный экспериментально проскок после завихрителя несбалансированного момента вращения и импульса при средней интенсивности закрутки воздуха позволяет нам предложить установку перфорированного кожуха перед лопатками завихрителя. Для горелок с завихрителем типа У предлагаем свой вариант установки в объеме улитки секционирующих дефлекторов, понижающих крутку, но выравнивающих закрученный воздушный поток. На них предусмотрено также управление выравниванием и закруткой вихря при необходимости.

Сохранение надежной стабилизации горения у горелок обеих групп реализуем модернизацией выходных конусов – раскателей потока, для чего предложены схемы конкретных систем их аэродинамической защиты от обгорания и износа потоком угольной пыли.

УДК 621.165:621.438

Т.Ф. БОГАТОВА, к.т.н., доцент, А.Ф. РЫЖКОВ, д.т.н., профессор,  
В.Е. СИЛИН, ассистент  
(УГТУ-УПИ)

## Вариант развития региональной энергетики

Предложенная РАО ЕЭС в феврале 2007 г. новая программа развития энергетики изменит и структуру топливного баланса – доля угля увеличится с 27 до 29 % к 2010 г. и с 29 до 37 % к 2015 г. Из известных угольных технологий, позволяющих достигнуть необходимого уровня эффективности, заметно выделяется газификационная, позволяющая наряду с эффективным решением проблем угольной энергетики, использовать мощный потенциал газотурбинного энергомашиностроения и отработанные схемы комбинированных парогазовых циклов.

В современных условиях, учитывая возможности отечественного энергомашиностроения, невозможен резкий переход на использование в энергетике угольных парогазовых технологий, разрабатываемых за рубежом. Целесообразен планомерный переход с газо-угольной энергетики и паросилового цикла к угольной энергетике и парогазовому циклу, осуществляемый в три технологических этапа: 1) надстройка паротурбинного угольного блока газовой турбиной на природном газе по параллельной схеме; 2) надстройка паротурбинного угольного блока газовой турбиной на природном газе по сбросной схеме; 3) перевод ГТУ на угольный генераторный газ и преобразование паротурбинного угольного блока в ПГУ.

Первый и второй этапы полностью поддерживаются возможностями энергомашиностроения России. Выполнение этого ряда мероприятий приведет к повышению КПД нетто станций не менее чем до 45-48 %. Третий этап находится в стадии демонстрационных работ и за рубежом. Отработка конструкций газификаторов, повышение температуры газа перед ГТУ позволят в перспективе получить КПД до 50 % на твердом топливе.

Предлагаемый подход к созданию ПГУ позволяет существенно сократить объем инвестиций на реализацию проекта ПГУ, получить компактный агрегат, который может быть установлен на существующих ТЭС с использованием имеющего котельного и турбинного оборудования. При этом решаются следующие задачи:

- снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на 10-15 % и достижение величины в 280 г.у.т/кВт·ч (при КПД газовой турбины 35 % и паровой – 38 %);
- снижение инвестиционных затрат на создание новых ТЭС на основе угольных ПГУ;
- создание компактной и динамичной генерирующей установки на твердом топливе, которую можно использовать как для реконструкции действующих энергопредприятий, так и для создания новых;
- возможность реализации данного проекта в короткие сроки.

## **Эффективность тепло-массообменных устройств градирен из перфорированных модулей из пластмассы на основе полимеров**

Тепло-массообменные устройства (ТМУ) градирен из перфорированных модулей (ПМ) из пластмассы на основе полимеров по способу формирования поверхности тепломассообмена являются устройствами дисперсионного типа, в которых поверхность контакта воды с воздухом формируется из капель путем многократного их дробления и слияния.

Основной задачей при разработке ТМУ из ПМ является обеспечение максимального использования физико-химических свойств пластмассы из полимеров. От совершенства конструкции ТМУ во многом зависит, необходимый для достижения расчетной глубины охлаждения, объем монтируемых конструкций.

В градирнях с ТМУ дисперсионного типа для раздробления поступающей воды применяются различные решетники, состоящие из элементов в виде брусков, планок, реек, а также ТМУ из перфорированных и гофрированных листов имеющих сечения элементов в виде различных геометрических фигур, например треугольника. При этом ТМУ из решетников представляют значительные по габаритам объемные многоярусные конструкции. От структуры и величины образующейся поверхности охлаждения воды во многом зависит охлаждающая эффективность ТМУ и градирен.

Структура и величина поверхности охлаждения, образующейся при раздроблении воды в решетнике, активная поверхность охлаждения определяются свободной поверхностью капель, падающих с одних элементов на другие. Капли воды, попадающие на элементы, ударяются об них, дробятся, образуя новые капельные структуры с новой поверхностью контакта с воздухом. При этом многоярусный решетник одновременно уменьшает среднюю скорость падения капель и перемешивание воды по пути ее движения.

Свободная поверхность воды в ТМУ из решетника складывается из трех основных частей поверхности:

а) водяной пленки, образующейся на элементах при обтекании их падающей сверху водой;

б) крупных капель, образующихся на нижних кромках элементов каждого яруса и падающих затем вниз;

в) брызг или мелких капель, образующихся при ударах падающих крупных капель о верхние плоскости нижележащих элементов.

В отличие от решетника, свободная поверхность воды в ПМ «насадка ИК-100» складывается из двух основных частей:

а) крупных капель, образующихся в углах пересечения нитеобразных элементов и падающих затем вниз;

в) брызг или мелких капель, образующихся при ударах падающих крупных капель о нитеобразные элементы и их пересечения.

Поверхность в виде пленки в ТМУ из ПМ отсутствует.

При этом в решетнике и ПМ форма и размер образующихся капель воды имеют схожую структуру и механизм их формирования. В отличие от решетников, в ПМ большая часть капель имеют большее время нахождения внутри пространства ПМ за счет продольного и поперечного их скатывания по нитеобразным элементам.

Форма и размеры капель, образующихся при стекании воды с решетников и ПМ, определяются условием равновесия сил поверхностного натяжения и внешних сил, действующих на жидкость, а также расположением, формой, углом наклона элементов.

Наибольший диаметр падающей капли приблизительно составляет 8,5÷9 мм (при температурах воды от 20 до 50°С). Капля после отрыва от поверхности кромки элемента решетника или от струйки приобретает под действием сил поверхностного натяжения сферическую форму.

Из-за сопротивления воздуха и сопротивления перфорации действительные скорости падающих вниз капель, особенно мелких, меньше скорости свободного падения.

Натурные испытания градирен с ТМУ из решетников и ПМ «насадка ИК-100» подтверждают выводы стендовых исследований. ТМУ из ПМ «насадка ИК-100» при объеме в два-три раза меньше, чем у решетников имеют объемный коэффициент теплообмена в два-три раза превосходящий объемный коэффициент теплообмена ТМУ из решетника и ТМУ со сплошными поверхностями, например, пленки ПВХ.

За 1996-2006 гг. произведено 11,0 миллионов штук ПМ из пластмассы на основе полимеров «насадка ИК-100». Выпуск ПМ «насадка ИК-100» с 1996 года обеспечил сохранность более 100,0 тыс. м<sup>3</sup> древесины, что соответствует площади 1500 га строевого хвойного леса.

Применение тепло-массообменного устройства из ПМ «насадка ИК-100» обеспечило увеличение выработки электрической мощности в среднем на 10 %, снижение себестоимости производства электроэнергии путем снижения расхода условного топлива в среднем на 1,2÷2,0 г/кВт·ч и уменьшения потерь воды до 1,5 % от объема оборотной воды каждой градирни. Например, на ТЭЦ-14 ОАО «Пермэнерго» имеющей ограничение мощности, фактический прирост мощности составил 50 МВт и одновременно снизился удельный расход топлива на 1,0 г/кВт·ч, что соответствует экономии в 2117 т у.т./год.

#### Литература

1. **Калатузов В.А.** Опыт ремонта и реконструкции градирен с применением современных материалов // Энергетик. – 2001. – №4.
2. **Калатузов В.А.** Повышение эффективности эксплуатации и модернизации циркуляционных систем электростанций и градирен // Энергетик. – 2003. – №4.

УДК 621.321

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, аспирант, В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,  
Е.В. БАРОЧКИН, к.т.н., доцент, В.Н. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Моделирование процессов тепломассообмена в стационарных режимах работы деаэратора ДА-300м**

Рассмотрена задача построения регрессионной модели процессов тепломассообмена для струйно-барботажного деаэратора типа ДА-300м по результатам его испытаний в условиях промышленной эксплуатации. Предложена гипотеза феноменологического подхода к математическому описанию этих процессов.

Деаэратор оснащен пробоотборными устройствами для отбора проб воды на входе в деаэрационную колонку, воды из первого и второго отсеков нижней распределительной тарелки деаэрационной колонки, воды с выхода струйной и барботажной ступеней деаэрационной колонки, воды из середины и с выхода деаэраторного бака, основного пара деаэратора. Проведены опыты при изменении регулируемых параметров в эксплуатационных диапазонах. При испытаниях контролировались теплотехнические параметры, характеризующие тепловое состояние рабочей среды по элементам аппарата, а также химические параметры качества проб воды и пара (значение рН, щелочность общая и по фенолфталеину, массовые концентрации растворенного кислорода и свободной угольной кислоты).

Выполнена статистическая обработка результатов измерений контролируемых параметров в соответствии с нормативными документами. Составлены регрессионные модели для процессов тепломассообмена в системе «вода-пар», а также для процессов газообмена с участием кислорода и угольной кислоты. В последнем случае учтены процессы генерации свободной угольной кислоты из бикарбонатов. В качестве аргументов приняты регулируемые теплотехнические параметры (расход и температура химочищенной воды на входе в деаэратор; давление пара в деаэрационной колонке; уровень воды в деаэраторном баке; расход пара на барботаж; расход выпара деаэратора), а также химические параметры качества исходной воды. Определены вероятностные характеристики параметров, вычисляемых косвенно с использованием математической модели.

При построении феноменологических математических моделей процессов тепломассообмена, реализуемых в струйно-барботажных деаэраторах, требуется определение коэффициентов теплопередачи и диффузии в струйных пучках. Сложность идентификации таких моделей состоит в том, что измеренные теплотехнические и химические параметры рабочей среды (при соответствующем оснащении аппарата пробоотборными линиями и средствами измерений) относятся к суммарной площади контакта фаз отсека струйной ступени. При относительно высокой гидравлической нагрузке деаэратора эта площадь может быть определена исходя из име-

ющихся данных о перфорации тарелок. При пониженных нагрузках деаэратора возникает необходимость учета неполного заполнения тарелок и, как следствие, снижения эффективной площади поверхности струй.

Для решения этой задачи проведены экспериментальные наблюдения процесса струеобразования в деаэраторе типа ДА-300м. Наблюдения предусматривали фото- и видеосъемку струйного пучка через открытый смотровой лючок деаэрационной колонки и измерение расхода направляемой в неё воды. При этом подача пара в деаэратор не осуществлялась, а вода, направляемая в колонку, имела температуру менее 50 °С для исключения запаривания межструйного пространства колонки. На рис. 1 показаны примеры фотоснимков, полученных в ходе испытаний.

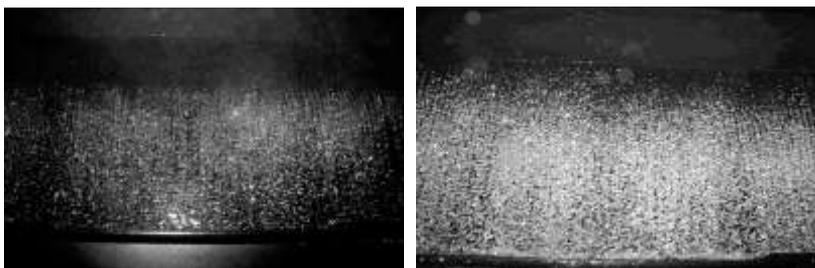


Рис. 1. Примеры фотоснимков картины струеобразования при расходах воды в колонку 47 м<sup>3</sup>/ч (слева) 125 м<sup>3</sup>/ч (справа)

Проведена обработка полученных результатов, предусматривающая подсчет доли отверстий перфорированной тарелки, участвующих в струеобразовании, при соответствующих гидравлических нагрузках деаэратора. Получена гидравлическая характеристика струйной ступени деаэратора при различных расходах воды, направляемой на деаэрацию. Опорные значения расходов воды таковы: 47 м<sup>3</sup>/ч – включение в работу всех отверстий первого отсека (до первого переливного порога); 130 м<sup>3</sup>/ч – включение в работу всех отверстий распределительной тарелки (до второго переливного порога); 370 м<sup>3</sup>/ч – переполнение распределительной тарелки с переливом воды через второй переливной порог.

С использованием разработанной математической модели проведены варианты расчеты для различных комбинаций значений влияющих факторов. В ряде режимов работы деаэратора выявлена неэффективная работа первого отсека струйной ступени деаэрационной колонки, где деаэрируемая вода насыщается кислородом и свободной углекислотой, что подтверждается и результатами испытаний (рис. 2). При этом концентрация компонентов превышает их концентрацию в химически очищенной воде на входе в деаэратор.

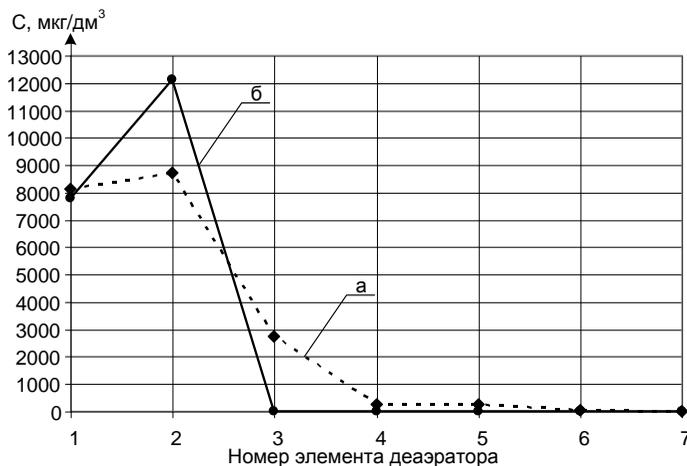


Рис. 2. Пример изменения концентрации растворенного кислорода и свободной углекислоты по элементам деаэратора (расход воды в деаэрационную колонку  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ , её температура  $48,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление избыточное в верхней части деаэрационной колонки  $13,5 \text{ кПа}$ , удельный расход барботажного пара в барботажное устройство деаэраторного бака  $21 \text{ кг/т}$ , уровень воды в деаэраторном баке  $1550 \text{ мм}$ , удельный расход выпара деаэратора  $1,5 \text{ кг/т}$ ): а – концентрация растворенного кислорода, б – концентрация свободной углекислоты, 1 – вход в деаэрационную колонку, 2 – выход первого отсека струйной ступени деаэрационной колонки (до первого переливного порога), 3 – выход первого отсека струйной ступени деаэрационной колонки (после первого переливного порога), 4 – выход струйной ступени деаэрационной колонки, 5 – выход непровального барботажного листа деаэрационной колонки, 6 – середина деаэраторного бака, 7 – выход деаэраторного бака

Определены критические сочетания режимных параметров (расхода и температуры химически очищенной воды на входе в деаэратор, давления пара в деаэрационной колонке, расхода выпара деаэратора), при которых наступает режим «захлебывания» деаэрационной колонки. Получена характеристика предельных режимов работы деаэратора (зависимость минимально допустимой по условию возникновения гидравлических ударов температуры химически очищенной воды, направляемой на деаэрацию, от гидравлической нагрузки деаэратора). Показано влияние качества греющего пара на процесс деаэрации, зависимость степени разложения бикарбонатов от расхода барботажного пара.

Результаты работы использованы при режимной наладке двух деаэраторов ДА-300м и четырех деаэраторов ДСА-300 теплосилового цеха ОАО «Северсталь», деаэратора ДСА-200 Ивановской ТЭЦ-1 и деаэратора ДСА-75 Костромской ГРЭС.

## Новая методика построения рабочих характеристик насосов при частотном регулировании их производительности

Рассмотрены наиболее распространенные методики построения рабочих характеристик насосов при частотном регулировании их производительности. Приведены примеры их использования при обработке результатов натурных испытаний насосов. На основании полученных характеристик точности определены области применения существующих методик. В частности, показано, что использование упрощенных формул пропорциональности (без учета изменения составляющих КПД насоса) при построении рабочих характеристик насоса с переменным числом оборотов ротора приводит к большим погрешностям. Применение известных зависимостей, описывающих изменение объемного и гидравлического КПД, для уточнения упрощенных формул пропорциональности не позволяет повысить их точность, поскольку эти зависимости применимы лишь в узких диапазонах изменения подачи насоса. Представленная в ряде литературных источников последних лет зависимость, описывающая изменение КПД насоса при варьировании числа оборотов ротора, носит общий характер и не может быть использована в практических расчетах. Её уточнение путем введения дополнительного коэффициента и применения более точной функции КПД насоса при номинальном числе оборотов ротора позволяет разработать адекватную математическую модель. Однако получение достаточно точных рабочих характеристик насоса с использованием этой модели возможно только при большом объеме экспериментальных данных.

Показана необходимость разработки уточненной математической модели насоса, эксплуатируемого при переменном числе оборотов ротора.

Предложена новая методика построения рабочих характеристик горизонтальных насосов типа «Д», оснащенных частотно-регулируемым электроприводом. Методика позволяет с достаточной степенью точности определять рабочие характеристики насоса при относительно малом объеме экспериментальных данных или их полном отсутствии.

Математическая модель включает следующие уравнения:

$$Q = Q_H \left( \frac{n}{n_H} \right)^{r+2} \cdot \left( \frac{\frac{H_H}{AQ_H^2}}{\frac{H}{AQ_H^2} - 1} \right)^{0.5}, \quad A = \frac{1}{1620000g\pi^2} \cdot \left( \frac{1}{d_H^4} - \frac{1}{d_{bc}^4} \right),$$

$$H = H_n \left( \frac{n}{n_n} \right)^2,$$

$$N = \frac{\rho g H_n Q_n}{1000 \cdot 3600 \eta_n} \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right)^3,$$

$$\eta = \eta_n \left( \frac{n}{n_n} \right)^{\gamma+1} \cdot \left( \frac{\frac{H_n}{A Q_n^2}}{\frac{H_n}{A Q_n^2} - 1} \right)^{0.5},$$

где  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч – объемная подача насоса;  $H$ , м вод. ст. – напор насоса;  $N$ , кВт – мощность на валу насоса;  $\eta$ , ед., – полный КПД насоса;  $n$ , об/мин – число оборотов ротора насоса;  $A$  – вспомогательный комплекс;  $g$ , м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения,  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – средняя плотность воды в насосе;  $d_n$  и  $d_{вс}$ , м, – диаметры соответственно напорного и всасывающего патрубков насоса;  $\gamma$  – параметр идентификации модели; индекс « $n$ » указывает на значение параметра при номинальном числе оборотов ротора.

Имея характеристики насоса при номинальном (или ином) числе оборотов ротора ( $Q_n$ ,  $H_n$ ,  $\eta_n$ ) в функциональном, табличном или графическом виде и задав один параметр идентификации  $\gamma$ , можно рассчитать рабочие характеристики при отклонении числа оборотов ротора. Параметр идентификации модели  $\gamma$  может быть определен по результатам испытаний либо задан исходя из опыта использования модели (обычно значение  $\gamma$  близко к 0,5).

В докладе приведены результаты использования разработанной методики при обработке результатов режимно-наладочных (функциональных) испытаний насосного оборудования (насосы типа «Д») участка химводоочистки теплосилового цеха ОАО «Северсталь»: четырех насосов Omega 200–520A производства KSB Aktiengesellschaft (Германия), четырех насосов 1Д-800-56, четырех насосов СЭ-800-55-11 и девяти насосов СЭ-500-70-16. Насосы оснащены блоками частотно-регулируемого привода производства General Electric Company (США).

Использование этой модели позволило значительно сократить количество рассматриваемых режимов каждого насоса: для каждого насоса выполнено от 4 до 9 опытов при отклонении числа оборотов ротора от номинального значения. Среднее отклонение расчетных значений параметров от опытных данных составило 2,6 %.

## **Применимость новых нормативных документов в области обработки результатов эксперимента**

Идентификация математической модели некоторого объекта проводится по результатам экспериментальных исследований. Данные эксперимента представляют собой совокупности значений измеряемых параметров, при этом каждому уровню параметра соответствует ряд его значений. Предварительная обработка результатов испытаний связана с применением статистических методов. В общем случае предусматривается решение следующих задач: повышение качества исходной информации (устранение неоднородностей данных), получение основных вероятностных характеристик экспериментальных данных, получение основных вероятностных характеристик параметров, определяемых косвенно с использованием математической модели.

В специальной литературе описано значительное число статистических методов обработки данных. Выбор метода обработки определяется задачами исследования и направлениями дальнейшего использования получаемых результатов. Однако главным требованием в отношении этих результатов является их представительность.

В целях обеспечения представительности получаемых результатов, экспериментальные исследования объектов теплотехники следует организовывать с учетом нормативных документов, регламентирующих процедуры статистической обработки результатов измерений. Комплекс действующих в настоящее время нормативных документов включает две группы: документы, введенные в действие до 2000-го года, действующие лишь на территории Российской Федерации, и относительно новые документы, соответствующие международным стандартам. Между этими регламентирующими материалами существует ряд различий. Предпочтительным является применение документов второй группы, однако к настоящему времени еще не накоплена достаточная база значений статистических характеристик многих методов измерений, что не позволяет полностью перейти к использованию международных стандартов. В этих условиях целесообразно сбалансировано применять методики, изложенные в документах обеих групп. С учетом этого разработан представленный в докладе алгоритм статистической обработки результатов измерений теплотехнических и химических параметров. Приведен пример использования этого алгоритма, сформулирован ряд требований к организации экспериментальных исследований с точки зрения последующей обработки результатов с использованием стандартизованных методов.

## **Разработка схем модернизации источников комбинированного производства электроэнергии и теплоты**

Повышение стоимости энергетического топлива вынуждает заниматься внедрением новых технологий. Теплофикация на базе мощных ТЭЦ – самая значимая энергосберегающая технология и в наибольшей степени отвечает техническому прогрессу. Высокая доля генерирующих мощностей на ТЭЦ в Беларуси – 57 %, сочетающаяся с инновационными технологиями теплофикации способна обеспечить значимый рывок в дальнейшем развитии энергосберегающей энергетики Республики Беларусь. Чем холоднее климат, тем значимее проявляется эффективность теплофикации.

Творческий специалист-теплоэнергетик, работающий на Омской ТЭЦ-6, А.Б. Богданов, одним из радикальных решений проблемы получения максимальной экономии топлива при комбинированном производстве тепловой и электрической энергии считает внедрение трехтрубной системы дальнего транспортирования тепла с выделением отдельной третьей трубы для нагрузки горячего водоснабжения [1]. Известный и авторитетнейший профессор термодинамики А.И. Андриющенко так же обосновал как более совершенную – схему однотрубного дальнего горячего водоснабжения городов от загородных ТЭЦ [2]. В работах доктора технических наук Ю.Е. Николаева и кандидата наук Д.В. Новикова из СГТУ развитие этой схемы осуществляется в направлении создания комбинированной системы горячего и холодного водоснабжения путем нагрева очищенной воды в теплофикационном пучке конденсатора или специальном подогревателе до температуры 30-40°С и транспорта ее потребителям [3]. Наиболее совершенный вид рассматриваемой системы теплофикации представлен в [4].

В качестве новых технических решений, наиболее подготовленных к внедрению и не требующих значительных капитальных вложений, предлагаются так же установки, обеспечивающие повышение экономичности за счет дополнительного подогрева сетевой воды и природного газа (при работе теплофикационных энергоблоков совместно с газотурбодетандерными установками) от регенеративного тракта теплофикационных турбин [5,6].

### **Литература**

1. **Богданов А.Б.** Теплофикация – золушка энергетики // Энергетик. – 2001. – №11. – С.5–10.

2. **Андрыюченко А.И.** Возможности повышения эффективности централизованного теплоснабжения городов // Промышленная энергетика. – 2002. – №6. – С.15– 18.
3. **Николаев Ю.Е., Новиков Д.В.** Система дальнего холодного и горячего водоснабжения рассредоточенных потребителей // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности. Материалы Пятой Российской НТК. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – С.30–33.
4. **Патент** Республики Беларусь № 7186. Способ и система теплоснабжения и горячего водоснабжения / А.Н. Шкода и др. // Оpubл. 2005.06.30.
5. **Патент** Республики Беларусь № 7509. Тепловая электрическая станция с паротурбинной и газотурбодетандерной установками / В.Н. Шкода, А.Н. Шкода и др. // Оpubл. 2005.12.30.
6. **Патент** Республики Беларусь № 7984. Теплофикационная энергетическая установка / В.Н. Шкода, А.Н. Шкода и др. // Оpubл. 2006.04.30.

УДК 697.34:621.311.22

В.К. БАЛАБАНОВИЧ, д.т.н., профессор, В.Н. ШКОДА, аспирант (БНТУ)

## Определение эффективности использования сбросной теплоты ТЭЦ

Экономичность работы теплофикационного цикла может характеризовать коэффициент использования теплоты  $K$ :

$$K = \frac{1 + q_2}{q_1}$$

где  $l$  – совершаемая в цикле полезная работа,  $q_2$  – отдаваемая внешнему потребителю теплота,  $q_1$  – подводимая в цикле теплота.

Представленный показатель учитывает только потоки энергии (I-й закон термодинамики), но не учитывает рассеяние энергии (II-й закон термодинамики). Поэтому требуется разработка новых методик расчета, которые будут учитывать различную ценность энергии, как по ее виду (электрическая и тепловая), так и по потенциалу (параметры отпускаемой теплоты).

Объективный показатель эффективности процессов комбинированной выработки энергии на ТЭЦ – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении, определяющая экономию топлива, которая достигается от работы теплофикационного потока пара. Эффективность же использования теплоты и эквивалентного ей топлива в зависимости от технологии ее производства (от производственно-отопительных котлов, из отборов паровой турбины, особенно при многоступенчатом подогреве воды для отопления и горячего водоснабжения) на равное количество отпускаемой теплоты может отличаться в 2 и более раз. А если вырабатывать внешнему потребителю теплоту или хотя бы ее часть за счет

сбросной тепловой энергии (непригодной для совершения работы), то вообще никакого дополнительного топлива не требуется.

Предположим, что отработавшее рабочее тело системы отдает теплоту другому телу, направляемому потребителю, за счет теплопередачи. Пусть  $T_1$  – температура одного из тел и  $dQ_1$  – получаемое (отдаваемое) им количество теплоты; пусть  $T_2$  и  $dQ_2$  – значение тех же величин для другого тела. Предположим, что  $T_1 > T_2$ , тогда  $dQ_1$  отрицательно,  $dQ_2$  положительно, к тому же

$$dQ_2 = -dQ_1,$$

поскольку, как отмечено выше, передача теплоты осуществляется без совершения работы. Изменение суммы двух энтропий равно:

$$dS_1 + dS_2 = \frac{dQ_1}{T_1} + \frac{dQ_2}{T_2}$$

или, учитывая соотношение между  $dQ_1$  и  $dQ_2$  равное потоку передаваемой теплоты  $dQ$ :

$$dS_1 + dS_2 = dQ \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Об эффективности такого отпуска теплоты, в зависимости от различия температур греющего и нагреваемого тел можно судить по потере мощности потоков:

$$E_{\text{потеря}} = T_0 \cdot S_{\text{выр}},$$

где  $T_0$  – абсолютная температура окружающей среды,  $S_{\text{выр}}$  – мера выработки энтропии

$$S_{\text{выр}} = \frac{Q(T_1 - T_2)}{T_1 \cdot T_2}$$

УДК 621.311.22

И.В. ОВЕРЧЕНКО, аспирант, А.С. ОСЫКА, к.т.н., гл. инженер,  
В.В. ВАРНАШОВ, к.т.н., с.н.с.  
(ОАО «Мосэнерго», ИГЭУ)

## **Результаты обследования и испытания дымовой трубы Н=150 м для ГТЭ-150 ГРЭС-3 Мосэнерго**

На ГРЭС-3 им. Классона установлены две газотурбинные установки типа ГТЭ-150, которые подключены к железобетонной дымовой трубе Н=150 м с внутренним металлическим стволом (ВМС)  $D_0=10,5$  м. Температура отводимых газов от турбин колеблется в диапазоне от 350 до 510 °С. ВМС выполнен из стали 09Г2С, работающей до температуры 420 °С. Газовые турбины работают по открытой схеме без котлов-утилизаторов.

Для охлаждения ВМС до безопасных температур разработана и внедрена аэродинамическая защита, заключающаяся в подаче воздуха из межтрубного пространства в пограничный слой уходящих газов. При этом воздух, распространяясь вдоль стенки, оттесняет высокотемпературные газы от последней, охлаждая ее.

Для подачи воздуха из межтрубного пространства в область пограничного слоя в местах установки компенсаторов ВМС на отметке 56 и 101 м выполнены кольцевые сопла с автоматическими клапанами.

Для охлаждения ВМС в отметке 4-56 м в цокольной части ствола установлена цилиндрическая вставка, отделенная зазором. Подача воздуха в зазор осуществляется через отверстия в нижней опорной плите газоотводящего ствола на отметке 4 м за счет самотяги, присутствующей в газоотводящем стволе.

Результаты обследования дымовой трубы (ввод в эксплуатацию в 1990 г.) проведенного нами в 2006 году, показали, что несущая железобетонная оболочка трубы находится в хорошем состоянии.

Поскольку ГРЭС-3 является пиковой, то газоотводящий ствол в основном находится в резерве. Обследование ВМС показало, что внутренняя ее поверхность корродирует от атмосферных осадков.

В целях проверки эффективности охлаждения газоотводящего ствола и разработки рекомендаций на дымовые трубы ПГУ были проведены замеры температуры стенок при работе одной газовой турбины с нагрузкой 92 МВт. Температура уходящих газов за ГТУ составила 360 °С при температуре наружного воздуха минус 12 °С.

В результате проведенных испытаний газоотводящего ствола установлено, что температуры стенок в конце защищаемых участков находится в диапазоне 184-309 °С, что ниже температуры газового потока.

Таким образом, проведенные испытания ВМС показали эффективность охлаждения ВМС при отводе высокотемпературных уходящих газов после газовой турбины. Подобный опыт сооружения таких стволов для ГТУ можно распространять и на ПГУ, который позволит использовать ее в любых режимах эксплуатации (ПГУ, ПТУ, ГТУ).

УДК 621.311.22

В.М. ПОРОШИН, аспирант, В.В. ВАРНАШОВ, к.т.н., с.н.с., М.А. ПИСАРЕВ, студент (ИГЭУ)

## Анализ схем внешних газоходов Ярославской ТЭЦ-3 и разработка их реконструкции

На Ярославской ТЭЦ-3 установлено шесть котлов типа ТГМ-84 и один котел БКЗ-320-140 ГМ, сжигающих высокосернистый мазут и природный газ. Удаление дымовых газов от котлов осуществляется через две железобетонные дымовые трубы высотой  $H=150$  м  $D_0=7$  м. Котлы № 1÷4 подключены к дымовой трубе № 1, котлы № 5÷7 – к трубе № 2.

Существующая аэродинамическая схема внешних газоходов энергетических котлов ст. № 1÷4 приведена на рис.1.а. Схема построена на использовании сборных (собирающих) газоходов. Сборные газоходы являются нерациональными элементами газоотводящего тракта, приводящие к увеличению его аэродинамического сопротивления и к снижению надежности его работы, поскольку ремонт сборного газохода возможен только при останове всех подключенных к нему котлов.

Все повороты (колена) и тройники схем выполнены под углом  $90^\circ$ , что приводит к пульсациям потоков и гидравлическим потерям напора дымососов и недобору нагрузки котлов. Нерационально выполнена цокольная часть дымовых труб, коэффициент потерь которых составляет  $\zeta=4,4$  вместо оптимальных  $\zeta=0,7\div 0,8$  в современных схемах.

Принципиальным решением при проектировании реконструкции газового тракта является полный отказ от использования тройников. Делается это путем выполнения полностью индивидуальных трактов «дымосос-газоход-дымовая труба», или разделением потоков тройников таким образом, чтобы смешение происходило только путем плоскопараллельного смешения потоков, движущихся в одном направлении.

Разработанные в ИГЭУ аэродинамические схемы реконструкции газоходов всех котлов и цокольной части дымовых труб по схеме рис.1.б снижают сопротивление всего газоотводящего тракта, что позволяет сэкономить около 3000 т.у.т./г и сократить вредные выбросы в атмосферу.

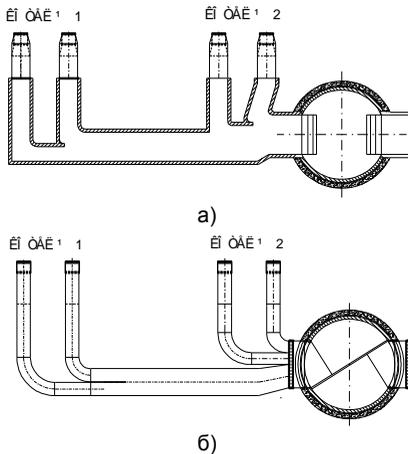


Рис.1. Существующая (а) и новая (б) схемы внешних газоходов котлов ТГМ-84 ст. № 1 и 2 Ярославской ТЭЦ-3 (газоходы котлов № 3-4 симметричны относительно оси трубы)

УДК 621.311.22

И.В. ОВЕРЧЕНКО, аспирант, Ю.В. САЛОВ, к.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## Газовоздухопроводы ПГУ

Приоритетным направлением в развитии теплоэнергетики до 2020 года является строительство наиболее экономичных парогазовых установок по сравнению с традиционными ПТУ. За период 2006÷2020 гг. в РФ предполагается установить 30 блоков ПГУ-450 общей мощностью 13,5 ГВт.

В связи с этим необходимо разработать и выработать единый подход к компоновке воздухопроводов с заборными устройствами, газоходов от ГТУ к котлам-утилизаторам (КУ), а также газоходы от них и сопряжение с дымовой трубой в зависимости от типов котлов (вертикальные или горизонтальные).

В зависимости от общей установленной мощности ПГУ в энергосистеме необходимо определиться в каком возможном режиме они могут работать (ПГУ, ГТУ, ПТУ). Так в энергосистеме ОАО «Мосэнерго» намечено строительство до 10 установок ПГУ-400-450 МВт в период до 2015 года.

В современных схемах ПГУ (КУ без дожигания) отключение газовой и паровой турбины приведет к отключению значительной мощности, как электрической, так и тепловой. В зимнее время это может привести к неблагоприятным последствиям в районах с мощными тепловыми потребителями.

При установке КУ с дожиганием этого явления можно избежать и повысить коэффициент надежности работы ПГУ в 2÷3 раза.

Для устанавливаемых ПГУ сооружаются металлические дымовые трубы в решетчатой башне на параметры уходящих газов после КУ и высотой с учетом фоновой загазованности.

К недостаткам такой компоновки дымовых труб следует отнести их высокую стоимость из-за большой металлоемкости самой башни и невозможности использования металлической трубы (сталь 3) для удаления газов после выхлопа ГТУ (при выходе из работы КУ).

С целью работы ПГУ в любых режимах необходимо разработать котел-утилизатор с дожиганием, а дымовую трубу металлическую – самонесущую с защитой от высоких температур уходящих газов (при работе только ГТУ).

Установка самонесущих металлических дымовых труб позволит:

- а) устанавливать их между котлами-утилизаторами;
- б) сократить сроки монтажа;
- в) сократить стоимость сооружения трубы и ее эксплуатации.
- г) сократить площадь в «ограде», что важно при расширении существующих ТЭЦ в городской черте.

## Тепловой режим работы дымовых труб ТЭС

Техническое состояние дымовых труб непосредственно влияет на работу основного оборудования (котлов и турбин) тепловых электростанций. Вследствие аварийного состояния или даже разрушения дымовой трубы необходимо остановить все энергоблоки, подключенные к этой трубе, с соответствующей недовыработкой тепловой и электрической энергии.

Длительная эксплуатация дымовых труб, как показывает опыт, приводит к разрушению ствола трубы в результате коррозии бетона и кирпича, а также к разрушению тепловой изоляции и футеровки. Это явление происходит вследствие изменения вида топлива, его состава, количества котлов, подключенных к дымовой трубе, температуры уходящих газов. Все эти факторы возникают при переменных режимах работы тепловых установок, которые могут не соответствовать проектным условиям.

Для энергетических котлов, работающих на газообразном топливе, целесообразно снижение температуры уходящих газов за счет установки различных теплообменников за последней конвективной поверхностью котла. Такие теплообменники могут использовать теплоту уходящих газов для различных целей: дополнительного подогрева обратной сетевой воды, подпиточной воды для теплосети, нагрева воздуха для вентиляции помещений.

Глубина снижения температуры газов определяется температурой точки росы, которая для газообразного топлива, не содержащего сернистых соединений, представляет собой температуру конденсации водяного пара при его парциальном давлении в уходящих газах.

При расчете теплообменников для утилизации теплоты уходящих газов и определения возможного уровня снижения температуры необходимо учитывать тепловой режим дымовой трубы, через которую удаляются дымовые газы.

Задача теплового расчета дымовых труб заключается в определении температурного поля по радиусу и высоте с учетом влияния различных режимных и естественных факторов. В качестве существенных факторов приняты – температура дымовых газов, расход топлива, количество котлов, подключенных к трубе, температура наружного воздуха, скорость ветра и ее распределение по высоте ствола, состав газообразного топлива, барометрическое давление. По уточненной методике для дымовых труб различных конструкций разработаны программы расчета статических давлений и температурного режима. Введение в программу эксплуатационных параметров котлов позволяет определить неблагоприятные условия работы трубы.

УДК 620.9(075)

Н.С. АСТАШОВ, А.Н. ГРАЧЁВ, К.В. КОРОМЫСЛОВ, И.Е. ШАМОНТЬЕВ, студ.;  
А.В. МОШКАРИН, д.т.н., профессор, Б.Л. ШЕЛЫГИН, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Совершенствование изучения вопросов эксплуатации паровых котлов с применением ПЭВМ**

В настоящее время преподавание дисциплин ориентировано на использование персональных компьютеров, когда с помощью автоматизированных учебных курсов (АУК) обеспечивается интенсивность обучения в сочетании с познавательным интересом за счёт оригинальности представления материала.

Для повышения эффективности подготовки специалистов на кафедре ТЭС ИГЭУ разработан программный комплекс «Эксплуатация паровых котлов». Изучается подготовительный этап, включающий обязанности дежурного персонала, проверку исправности элементов котельной установки, оценку теплового состояния котла по характерным параметрам.

Рассматриваются организационные особенности пуска барабанных котлов высокого, среднего и низкого давлений. Объясняется порядок пуска котла высокого давления из холодного, неостывшего и горячего состояний. Изучается последовательность растопки котла при изменении рабочих параметров, сопровождающаяся соответствующим анализом с демонстрацией фрагментов растопочной схемы и графика-задания повышения нагрузки.

Подробно изучается переменный режим работы котла с объяснением влияния определяющих факторов на выходные параметры энергоустановки, вопросы управления котлоагрегатом действиями персонала и применением АСУ. Рассматриваются варианты останова котла с расхолаживанием, в резерв, длительный резерв или ремонт. Объясняются особенности аварийного останова котла действием защит или оперативного персонала.

По окончании изучения всех разделов пользователю программным продуктом предлагаются контрольные вопросы для оценки знаний усвоенного материала. Иллюстрация текстового материала большим количеством рисунков, схем, графиков с применением элементов анимации способствует усвоению дисциплины и повышает качество подготовки специалистов.

Программный продукт подготовлен в операционной системе Windows с использованием графического редактора Corel Draw, Adobe Photoshop, анимация разработана в среде Flash Macromedia, Adobe ImageReady. Повышающий эффективность и скорость индивидуального обучения АУК с успехом может применяться как при организации учебного процесса в вузах, так и в учебных центрах ТЭС на стадии подготовки персонала к предстоящей профессиональной деятельности.

УДК 620.9(075)

В.А. КОЛЯДА, А.Р. ЛОШКАРЁВ, А.А. СИЛИЧ, Р.С. ФОМИН, студ.,  
А.В. МОШКАРИН, д.т.н., профессор, Б.Л. ШЕЛЫГИН, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Повышение эффективности изучения водогрейных котлов с использованием персональных компьютеров**

Учебный процесс должен быть направлен на использование персональных компьютеров, когда с помощью автоматизированных учебных курсов (АУК) обеспечивается интенсивность обучения студентов. На кафедре ТЭС ИГЭУ разработан компьютерный учебник «Водогрейные котлы». Необходимость создания данного программного продукта вызвана недостатком технической литературы и низкой квалификацией эксплуатационного персонала котельных.

В работе рассматриваются особенности наиболее распространённых вариантов водогрейных котлов с номинальной теплопроизводительностью 4÷116 МВт. Изучаются вопросы подготовки и организации сжигания топлив, разбираются конструкции топочно-горелочных устройств. Приводится детальный анализ составляющих уравнения теплового баланса энергоустановки. Подробно рассматриваются компоновки, тепловые и циркуляционные схемы отдельных марок водогрейных котлов. Изображается взаимное расположение радиационных конвективных поверхностей нагрева, иллюстрируется их конструктивное выполнение с указанием основных геометрических характеристик. Детально изучаются особенности теплового и воздушного режимов топочного процесса с анализом влияния температуры, коэффициента избытка воздуха, влажности топлива на экономичность и характеристики по длине выгорания факела. Изучаются гидродинамические особенности водяного тракта агрегата и температурный режим труб поверхностей нагрева. Даются рекомендации по обеспечению гидравлической стабильности в отдельных элементах установок.

Наглядность АУК обеспечивается параллельной иллюстрацией изложенного материала схемами, рисунками, графиками, применением элементов анимации. Изучение работы заканчивается проверкой полученных знаний подключением блока контрольных вопросов с последующей демонстрацией результатов ответов.

Компьютерный учебник выполнен в операционной системе Windows с использованием графического редактора Corel Draw. Анимация разработана в среде Flash Macromedia с применением средств пакета Microsoft Office.

Разработанный программный продукт рассчитан на студентов теплоэнергетических специальностей работников энергопредприятий. В ходе занятий выявлена эффективность использования АУК в процессе индивидуального обучения.

УДК 621.365:536.33

А.Н. МАКАРОВ, д.т.н., профессор, Д.С. ПАВЛОВ, А.Ю. СОКОЛОВ, аспирант (ТГТУ)

## Геометрическая, физическая и математическая модель факела промышленных печей

Теплообмен излучением является основным видом теплообмена в промышленных факельных нагревательных и плавильных печах и составляет 90–98 % всего теплообмена [1]. В существующих методах расчета теплообмена в факельных печах вводится допущение: участие в теплообмене принимает не сам газ, а ограничивающая его воображаемая поверхность. В большинстве случаев рабочее пространство печей и топков представляет собой прямоугольный параллелепипед, и факел в зональном методе моделируется рядом плоскопараллельных поверхностей с различными температурами и радиационными характеристиками. Недостатком метода является то, что при расчетах не учитывается конфигурация факела. Однако размеры, форма факела оказывают определяющее влияние на теплообмен с поверхностями нагрева.

Факел представляет собой геометрическое объемное тело в виде вытянутого эллипсоида вращения [2], где протекает реакция горения топлива, продукты горения заполняют объем между эллипсоидом и нагреваемыми телами, кладкой. В эллипсоид вписываются излучающие цилиндрические объемы в соответствии с распределением изотерм по объему факела [3]. Выведены пять свойств коаксиальных цилиндрических газовых объемов: 1) угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндров одинаковой высоты равны между собой; 2) средняя длина пути лучей от коаксиальных цилиндров до расчетной площадки одинакова и равна среднеарифметическому расстоянию от расчетной площадки до оси симметрии цилиндров; 3) плотность потока излучения одинакова и не зависит от диаметра цилиндров; 4) суммарная плотность потока излучения нескольких излучающих и поглощающих цилиндров равна плотности потока излучения коаксиального цилиндра малого диаметра; 5) при моделировании факела цилиндрами результаты расчета включают в себя объемное излучение и поглощение всех слоев факела и их теплообмен со всеми поверхностями нагрева. Получены аналитические зависимости, связывающие геометрические, оптические, энергетические параметры факела и поверхностей нагрева [3].

### Литература

1. **Теплотехнические** расчеты при проектировании нагревательных и термических печей / Под ред. А.Б. Усачева. – М.: Черметинформация, 1999.
2. **Макаров А.Н., Дунаев А.Ю.** Расчет теплообмена в регенеративном нагревательном колодце // Промышленная энергетика. – 2004. – №10. – С.49–53.
3. **Макаров А.Н.** Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч.1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. – Тверь: ТГТУ, 2007.

УДК 621.165.46.001-42.001.36

М.Ф. ЦЕЛИЩЕВ, аспирант, П.Н. ПЛОТНИКОВ, д.т.н., профессор  
(УГТУ-УПИ)

## **Расчетно-экспериментальное моделирование процесса вальцевания трубок в трубных досках теплообменных аппаратов энергоустановок**

Завальцованные трубки оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние трубных досок (ТД) теплообменных аппаратов (ТА) энергетических установок. Данное влияние, как правило, не учитывается при расчете ТА. Моделирование и оптимизация процесса вальцевания является чрезвычайно важной и вместе с тем сложной задачей. С одной стороны, вальцовочное соединение должно обеспечивать герметичное соединение на протяжении всего срока службы аппарата, а с другой стороны, технология вальцевания не должна повлечь за собой возникновения повышенных напряжений и деформаций на других элементах аппарата [1,2].

В рамках данной работы выполнено решение контактной задачи взаимодействия трубки с ТД в упругопластической постановке. Для решения задачи использовалось моделирование методом конечных элементов (МКЭ). Сначала были выполнены расчеты максимального и остаточного давления, создаваемого одиночным вальцовочным соединением при оптимальной степени развальцовки. Затем в качестве примера рассмотрен маслоохладитель МБ-270, применяемый в схеме турбоустановки энергоблока К-800. Задача решалась в два этапа: на первом определялись максимальное и остаточное давление, создаваемое развальцованными трубками на ТД, на втором – прогиб и напряжения ТД под действием внутреннего остаточного давления с учетом истории процесса вальцевания. Применение МКЭ позволило также получить картину распределения остаточных технологических напряжений в ТД, которые вблизи отверстий достигают предела текучести.

В рамках данной работы проводилась также серия экспериментальных исследований по определению деформирования ТД реальных ТА в процессе вальцевания в них трубок. Сопоставление расчетного прогиба ТД с экспериментально измеренным показало достаточно их хорошее совпадение. Это позволяет рекомендовать описанный расчетный метод для оценки остаточных напряжений и деформаций в ТД после вальцевания в ней трубок с целью дальнейшего учета данных факторов при расчетах прочности ТА от эксплуатационных нагрузок.

### **Литература**

1. **Надежность** кожухотрубных теплообменных аппаратов паротурбинных установок: Учебное пособие / Ю.М. Бродов, П.Н. Плотников. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 242 с.
2. **Юзик С.И.** Развальцовка труб в судовых теплообменных аппаратах // Судостроение, 1978.

УДК 621.311

А.В. АНДРЮШИН, д.т.н., Е.Н. ПОЛУШКИНА, Е.Ю. ШНЫРОВ, к.т.н.  
(МЭИ (ТУ))

## **Системные риски, возникающие при строительстве энергетических объектов**

В последние годы, в связи с развитием российской экономики в РФ наблюдается стабильный рост энергопотребления. Ожидается, что в 2008 г. энергопотребление в РФ приблизится к историческому максимуму. До определённого времени рост энергопотребления можно было покрыть, во-первых, за счёт увеличения КИУМ существующих электростанций и электрических сетей, и, во-вторых, за счёт точечных вводов новых генерирующих мощностей, которые в течение последних лет составляли не более 1÷1,5 ГВт в год. Как следствие, в РФ произошло накопление отложенного спроса на строительство генерирующих и электросетевых мощностей.

В ответ на возникший спрос Правительством РФ и крупными энергетическими компаниями, такими как РАО «ЕЭС России» (включая ФСК и Гидро-ОГК) и ГК «Росэнергоатом», были разработаны масштабные инвестиционные программы, которые предполагают значительное увеличение ввода генерирующих мощностей и инфраструктурных объектов. Отсутствие практики реализации крупных проектов обуславливает возможности возникновения системных рисков. К наиболее значимым рискам при строительстве генерирующих мощностей могут быть отнесены риски, возникающие в таких сферах как проектирование, изготовлении основного оборудования, осуществление строительно-монтажных и пусконаладочных работ. Системные риски, возникающие при проектировании, являются одними из самых значимых для Заказчика, так как их реализация влияет на объект не только на этапе его строительства, но и в процессе дальнейшей эксплуатации.

В настоящее время на российском инжиниринговом рынке существует всего 3-5 компаний (специализирующихся на строительстве ТЭС, ГЭС, АЭС), которые могут выполнять строительство крупных энергетических объектов «под ключ». Проецируя опыт зарубежных стран на российский инжиниринговый рынок, образование компаний-лидеров рынка одно из важных условий успешного осуществления масштабных проектов по вводу генерирующих мощностей. Образование полноценных EPC-контракторов (EPC-контрактор – Engineering, Procurement, Construction (Управление проектированием, Доставка, Строительство) является необходимым условием реализации энергетических проектов с применением схемы проектного финансирования.

В настоящее время в стране существуют необходимые условия для создания таких компаний – большой спрос на строительство генерирующих мощностей и готовность государства и крупных промышленных компаний инвестировать в эти проекты.

УДК 621.18.021

В.П. ДЕРИЙ, инженер, В.К. СЕМЕНОВ, д.т.н., профессор,  
В.Ф. СТЕПАНОВ, инженер, В.С. ЩЕБНЕВ, к.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## **Прогнозирование надежности и ресурса трубчатки парогенераторов АЭС с ВВЭР**

Главным элементом, обеспечивающим ресурс парогенераторов АЭС, является трубчатка, состояние которой, в первую очередь, определяется водно-химическим режимом. Задача прогноза ресурса трубчатки должна заключаться в определении времени достижения числом заглушенных трубок некоторого критического значения. По наступлению названного момента времени устройство должно сниматься с эксплуатации. Коррозионные повреждения теплообменных трубок определяются целым комплексом условий: накоплением отложений занесенных продуктов коррозии оборудования и трубопроводов второго контура, тепловым и динамическим режимом работы аппарата, внешними механическими воздействиями, наличием химически активных частиц, и пр. Обычно указанная задача решается методом аппроксимации реального распределения вероятностей одной из известных произвольно взятых функций распределения [1]. На наш взгляд прогноз должен базироваться не на основе произвольно выбранных аппроксимирующих функций, а на законе роста числа повреждений.

Поскольку многие причины повреждения трубчатки являются неконтролируемыми, то на процесс старения следует смотреть как на стохастический и исходить из вероятностных представлений. Исследование базируется на предположении, что процесс повреждения ТОТ является стохастическим непрерывным во времени и дискретным по числу заглушенных трубок марковским процессом, описываемым уравнением Колмогорова.

В работе на основе общих физических соображений и регрессионного анализа результатов наблюдений за состоянием трубчатки отдельных парогенераторов предложено полумпирическое уравнение кинетики роста числа заглушенных трубок и методом моментов получено аналитическое решение уравнения Колмогорова для среднего числа заглушенных трубок и дисперсии распределения. На основании полученных решений прогнозируется время капитального ремонта или момент снятия аппарата с эксплуатации. Предложенная теория использована для прогноза состояния трубчатки парогенераторов НВАЭС.

### **Литература**

1. **Олейник С.Г.**, Беляков О.А., Костюков О.Е., Марцинюк Л.С. Использование вероятностных методов при изучении повреждаемости теплообменных трубок парогенераторов на АЭС с ВВЭР // ЭНИЦ-2004. Годовой отчет. – 2004. – С.184-190.

УДК 621.039.58

В.П. ДЕРИЙ, инженер, В.К. СЕМЕНОВ, д.т.н., профессор,  
В.Ф. СТЕПАНОВ, инженер, В.С. ЩЕБНЕВ, к.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## **Прогнозирование отложения продуктов коррозии на теплообменных поверхностях парогенераторов АЭС с ВВЭР**

Главным элементом, обеспечивающим ресурс парогенераторов АЭС, являются теплообменные трубки, состояние которых, в первую очередь, определяется водно-химическим режимом. Одной из основных проблем водно-химического режима является поступление в парогенератор и отложение на теплообменных трубках продуктов коррозии конструкционных материалов конденсатно-питательного тракта. Эти отложения являются ловушками для различных химически-активных частиц, инициирующих коррозионные повреждения трубок. Основным методом борьбы с указанным негативным явлением является организация химических промывок, сроки которых должны прогнозироваться по достижению удельной загрязненности теплообменных трубок предельного значения, равного  $150 \text{ г/м}^2$ .

Процесс накопления отложений определяется многими факторами: тепловым и динамическим режимом аппарата, распределением и составом коррозионно-активных частиц, наличием внешних механических воздействий, состоянием поверхности трубчатки и пр. Многие из величин можно считать определенными, детерминированными, тогда как сам процесс осаждения примесей – процесс случайный, а поверхностная концентрация примесей – случайная величина. Работа базируется на предположении, что рассматриваемый процесс является непрерывным по времени и числу отложений марковским процессом, подчиняющимся уравнению Фоккера-Планка. Решение уравнения Фоккера-Планка можно найти только численными методами при помощи вычислительной техники. Между тем, для практики часто достаточно знать, как ведут себя средние числа отложений и их флуктуации. Для знания этих величин не требуется определения явного вида функции распределения. В работе методом моментов получены уравнения для средних величин коррозионных и их флуктуаций. На основании физической теории адсорбции и результатов экспериментального обследования парогенераторов предложено полуэмпирическое уравнение для кинетики накопления коррозионных отложений. Коэффициенты идентификации этого уравнения определяются на основе регрессионного анализа результатов обследования парогенераторов. Полученные аналитические решения для средних величин отложений и их флуктуаций апробированы для прогноза сроков химической промывки отдельных парогенераторов КАЭС.

## **Исследование режима естественной циркуляции теплоносителя в РУ ВВЭР-1000**

Как известно, режим естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦТ) в настоящее время используется только при аварийном расхолаживании реактора ВВЭР в режиме полного обесточивания. При этом мощность остаточного энерговыделения, снимаемого с активной зоны (АЗ), не превышает 7-10 % от номинальной. Весьма заманчивым представляется в режимах, связанных с аварийным остановом ГЦН перевод реактора в режим ЕЦТ, обеспечивая его работу на пониженном уровне мощности с сохранением выработки электроэнергии в этот период. Однако, для обеспечения отвода от реактора достаточно большой тепловой мощности (до 30-40 % от номинальной) требуется значительное увеличение подогрева теплоносителя в реакторе. Теплогидравлические расчеты реактора ВВЭР-1000, выполненные на различные температуры теплоносителя, показали, что для обеспечения основных показателей теплотехнической надежности на проектном уровне (температура оболочек твэл, коэффициент запаса до кризиса теплообмена) необходимо значительное уменьшение температуры на входе в реактор, что приводит к снижению давления генерируемого в парогенераторах пара.

Как показали расчеты режимов ЕЦТ серийного реактора ВВЭР-1000, при значениях температур теплоносителя на входе и выходе из АЗ  $T_{\text{вх}}/T_{\text{вых}} 250/328^\circ\text{C}$  удастся обеспечить тепловую мощность реактора примерно 1220 МВт. При этом запас до кризиса теплообмена в опасном сечении остается на уровне значений, характерных для номинального режима работы реактора.

Давление пара в ПГ снижается в этом режиме до 3,9 МПа, а турбоустановка работает с частично прикрытыми клапанами перед ЦВД. Электрическая мощность в этом режиме  $N_9=300$  МВт при  $\eta_{\text{эл}}^{\text{нетто}}=28,5\%$

Максимально возможная электрическая мощность (с полностью открытыми клапанами ЦВД), равная ~445 МВт, обеспечивается при значениях температуры на входе и выходе из АЗ  $230/324^\circ\text{C}$ , что соответствует тепловой мощности реактора ~1500 МВт. Но в этом режиме практически отсутствует запас до кипения на выходе из наиболее энергонеприятной ТВС, поэтому данный режим является предельным.

Таким образом, имеется реальная возможность работы энергоблока с ВВЭР-1000 в режиме ЕЦТ на уровнях мощности до 30÷40 % от номинальной.

## **Модульная АЭС с водоводяными реакторами малой мощности**

Предлагается концепция модульной АЭС с реакторными модулями малой мощности на базе реакторов с водой под давлением. Ядерная паропроизводящая установка такой АЭС состоит из нескольких реакторных модулей мощностью 40÷50 МВт (эл.), что позволяет обеспечить любую единичную мощность энергоблока – вплоть до 600÷1000 МВт и более.

В состав реакторного модуля высокой степени заводской готовности входит водоводяной реактор тепловой мощностью 120 МВт, вертикальный парогенератор насыщенного пара с давлением  $p_{\text{пг}} = 6,4$  МПа, ГЦН, компенсатор давления, гидроемкости САОЗ, емкость аварийного ввода бора, теплообменник пассивной системы расхолаживания. Все оборудование унифицированного реакторного модуля komponуется в металлическом страховочном корпусе диаметром 5,5 м и высотой 17,2 м, рассчитанном на полное давление теплоносителя 16 МПа. Для энергоблока электрической мощностью 640 МВт (турбина К-640-5,9/3000) необходимо число реакторных модулей равно шестнадцати.

Все реакторные модули устанавливаются внутри защитной герметичной оболочки диаметром 45 м и высотой 42 м. Там же, внутри гермооболочки, размещается общий бассейн перегрузки топлива и гермоемкости САОЗ низкого давления. Высокий уровень безопасности энергоблока обеспечивается применением, кроме нескольких барьеров безопасности, также пассивной системы расхолаживания с воздушными теплообменниками для отвода тепла в аварийных ситуациях от реактора и гермообъема.

Использование большого числа реакторных модулей малой мощности позволяет сократить время перегрузки топлива и увеличить годовую выработку электроэнергии, т.к. при перегрузке останавливается лишь один реакторный модуль на непродолжительное время с незначительным снижением электрической мощности. Кроме того, параметры реакторной установки таковы, что имеется возможность небольшого форсирования реактора, что позволяет не снижать электрическую мощность блока.

Применение выгорающего поглотителя (европия) для компенсации начального запаса реактивности и неравномерности энерговыделения обеспечивают высокую эффективность использования ядерного топлива. Расчетная продолжительность кампании реакторного модуля в стационарном режиме перегрузок составляет 5 лет. Предварительные оценки показали конкурентоспособность энергоблока модульного типа с аналогичным энергоблоком на базе реактора ВВЭР-640 (В-407).

УДК 621.039

А.Г. ИЛЬЧЕНКО, к.т.н., доцент, В.Г. ШОШИН, к.т.н., доцент,  
А.В. ВАСИЛЬЕВ, С.Н. ДЕМИН, студент  
(ИГЭУ)

## **АЭС малой мощности с реактором КЛТ-40С**

Атомные электростанции малой мощности (АЭС ММ) различного назначения – это особый вид атомных энергоисточников, характеризующихся компактностью исполнения, повышенной безопасностью и отсутствием вредного влияния на окружающую среду.

Особенно перспективно их применение в отдаленных районах северо-востока России.

В докладе представлены результаты разработки проекта стационарной двухблочной АЭС с реактором КЛТ-40С и несколькими вариантами турбоустановок, отличающихся начальными параметрами пара и схемными решениями.

Основные характеристики реактора КЛТ-40С:

- тепловая мощность – 150 МВт;
- давление теплоносителя в реакторе – 12,7 МПа;
- температура теплоносителя на входе – 278°С, на выходе – 319°С;
- удельная энергонапряженность активной зоны – 136 МВт/м<sup>3</sup>.

В качестве основного варианта рассматривалась установка с реактором одноцилиндровой турбины перегретого пара электрической мощностью 40 МВт без промежуточной сепарации и упрощенной системой регенерации (1хПНД + Д + 1хПВД).

Начальные параметры перед турбиной ( $p_0=3,5$  МПа,  $t_0=290^\circ\text{C}$ ) обеспечиваются вертикальным прямоточным парогенератором.

В двух других вариантах рассматривалась турбина насыщенного пара ( $p_0=5$  МПа) с одной ступенью промежуточной сепарации (выносной сепаратор или встроенный в ресивер между ЦВД и ЦНД сепаратор пленочного типа).

Расчеты тепловой схемы турбоустановок показали, что наибольшей тепловой экономичностью обладает вариант турбоустановки на перегретом паре с нерегулируемым теплофикационным отбором  $\eta_3^H = 30,1\%$ , что на ~1% превышает к.п.д. для турбин насыщенного пара, несмотря на более развитую в этих вариантах систему регенерации (3хПНД + Д + 1хПВД).

Расчетная себестоимость электроэнергии для двухблочной АЭС с турбинами ТК-40-3,5/3000 при числе часов установленной мощности  $\tau_{уст} = 5500$  ч составила 74 коп/кВтч.

УДК 621.18.021

В.К. СЕМЕНОВ, д.т.н., профессор, А.А. БЕЛЯКОВ, аспирант (ИГЭУ)

## Об одном возможном механизме электрохимической коррозии

Как известно, при погружении металла в полярную жидкость или, жидкость, содержащую ионы, происходит выход ионов металла в жидкость и образование вблизи поверхности металла двойного электрического слоя, препятствующего дальнейшему растворению металла. Механизм электрохимической коррозии обусловлен разрушением двойного электрического слоя за счет образования на поверхности металла короткозамкнутых электрохимических ячеек, стимулирующих протекание анодных и катодных процессов – выход ионов металла в электролит и отвод отрицательного заряда металла. Происхождение этих ячеек связано с несколькими причинами: неоднородным строением поверхности металла, обусловленным наличием на поверхности посторонних примесей, у которых работа выхода электронов на поверхность оказывается меньше работы выхода основного металла и т.п. На наш взгляд, существует еще один механизм, который может иметь место при коррозии под напряжением. Металлографические исследования образцов теплообменных труб, вырезанных из разных парогенераторов АЭС, приводят к выводу, что наиболее часто подвержены разрушению коллекторы и теплообменные трубки. Основным механизмом, ответственным за повреждение коллекторов и трубочки является коррозионное растрескивание под напряжением. Минимальный заряд каждого берега по модулю равен заряду электрона. Считая микротрещину плоским конденсатором, найдем напряженность поля в промежутке между берегами

$$E = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon a^2}, \quad (1)$$

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $a$  – постоянная решетки,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей микротрещину. Разность потенциалов между берегами трещины толщиной  $d$  будет равна:

$$u = Ed = \frac{ed}{\varepsilon_0 \varepsilon a^2}. \quad (2)$$

Подставляя сюда  $a = (3-4)10^{-10}$  м,  $\varepsilon=80$ ,  $d=(10^{-5} - 10^{-4})$  см, получим следующую оценку для разности потенциалов  $u \sim 0,2 \div 2$  кВ. Наличие таких локальных источников тока в микротрещинах может весьма сильно интенсифицировать процесс кристаллитной и межкристаллитной электрохимической коррозии за счет имплантации ионов примесей в металл.

## **Исследование гидравлических характеристик ТВС ВВЭР-440 в рамках виброшумовой диагностики реакторных установок**

Современные концепции безопасной эксплуатации атомных станций базируются на широком внедрении систем ранней диагностики. Одной из таких систем является система виброшумовой диагностики (ВШД) реакторной установки, которая занимается определением вибросостояния внутрикорпусных устройств, тепловыделяющих сборок, корпуса реактора и основного оборудования главного циркуляционного контура по совокупному анализу сигналов различных датчиков вибраций в эксплуатационных условиях.

Вибрации всегда представляют собой угрозу безопасной эксплуатации АЭС. После ряда инцидентов, связанных с повышенной вибрацией оборудования реакторных установок, фирмы-производители во всем мире стали уделять особое внимание проблемам вибрационной надежности как на стадии проектирования и стендовой отработки элементов оборудования, так и в период пусконаладочных работ, а затем и в период нормальной эксплуатации блоков.

В реакторах ВВЭР-440 одной из важных задач является исследование гидравлических характеристик ТВС. Данные исследования представляют интерес и с точки зрения вибрационной диагностики из-за наличия у ТВС чехла.

Рассмотрены следующие вопросы:

1. Состояние вопроса виброшумовой диагностики на сегодняшний день:
  - зарубежный опыт ВШД ТВС в эксплуатационных условиях;
  - виброконтроль ТВС реакторов ВВЭР-440 зарубежными программно-техническими комплексами.
2. Моделирование вибраций ТВС ВВЭР-440.
3. Нейтронный шум ВВЭР. Теплогидравлические источники нейтронного шума, маскирующие вибрационные эффекты.
4. Экспериментальные исследования на реакторной установке ВВЭР-440.

### **Литература**

1. **Аркадов В.Г.**, Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР / под ред. А.А. Абагына. – М.: Энергоатомиздат, 2004.

УДК 621.039.521

А.Ю. ТОКОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)А.А. МОХОНОВ, С.С. КОТОВ, инженер  
(ОАО «Машиностроительный завод», г. Электросталь)

## Исследование метрологических характеристик стандартных образцов выгорающих поглотителей

Применение выгорающих поглотителей (ВП) при изготовлении ТВС дает широкие возможности для совершенствования технико-экономических показателей ядерных реакторов. Подбором оптимального соотношения между количеством ВП и топлива можно добиться увеличения продолжительности кампании, глубины выгорания топлива, скомпенсировать начальный запас реактивности, выровнять энерговыделение в активной зоне. Это позволяет уменьшить требуемое количество подвижных поглощающих стержней СУЗ и упростить конструкцию реактора.

В качестве материалов для ВП используются бор, кадмий, гадолиний и др. Эффективность ВП характеризуется изменением реактивности критической сборки ( $\Delta\rho$ ) при помещении в нее изделий, содержащих бор, и выражается в виде эффективной массы бора ( $g$ ). Уравнение градуировки ВП имеет вид  $\Delta\rho = ag + b$ , где  $a, b$  – коэффициенты, получаемые экспериментально на критической сборке с помощью стандартных образцов физической эффективности (СОФЭ), которые представляют собой комплекты пластин из циркониевого сплава, насыщенных естественным бором. Т.к. нейтронное поле неоднородно по высоте активной зоны, СОФЭ должны иметь одинаковые длины с ВП (стандартный ряд от 480 до 1333 мм с шагом 13 мм), при этом значения градуировочных коэффициентов  $a, b$  при разных длинах СОФЭ оказываются существенно различными.

Метрологические характеристики СОФЭ (масса физически эффективного бора и погрешность ее определения) подлежат подтверждению раз в 10 лет. Как метрологическая аттестация (сравнение с образцами более высокого уровня точности), так и заказ на изготовление новых комплектов СОФЭ в настоящее время требуют от ОАО «МСЗ» вложения больших финансовых средств и многочисленных согласований с заинтересованными организациями. Другой способ подтверждения метрологических характеристик заключается в том, чтобы формулу градуировки, полученную для одного образца, можно было бы использовать для расчета массы бора в остальных СОФЭ.

С этой целью на уран-графитовом критстенде №5 ОАО «МСЗ» была проведена серия экспериментов по определению зависимости эффективности образца от его длины и выведен критерий подтверждения стабильности метрологических характеристик СОФЭ. Результаты исследований позволили продлить срок действия метрологических свидетельств на все комплекты СОФЭ до 2017 года.

#### Литература

1. **Бать Г.А.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. **ГОСТ 8.207-76.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений.

УДК 621.039.

В.Г. ШОШИН, к.т.н., доцент, Д.В. СТЕПАНОВ, С.С. КЛИМОВ, студент (ИГЭУ)

### Электронный каталог прототипов турбин АЭС

Целью каталога является идея восполнить информационный вакуум по основным прототипам турбоагрегатов, которые использовались и продолжают использоваться в атомной энергетике Российской Федерации и стран бывшего СССР.

Электронный каталог содержит краткое описание каждого прототипа: завод-изготовитель, год разработки, основные характеристики, модификации, область применения, тепловые схемы, параметры отборов; максимально возможно подробный чертеж турбоагрегата, отдельные подкаталоги типов различных деталей.

Принцип работы с каталогом осуществляется по технологии клиент-сервер, что позволяет открыть ресурс широкому кругу пользователей через внутреннюю ЛВС вуза или интернет, и в то же время ввести некоторые ограничения по использованию полученной ими информации.

Главным преимуществом электронного каталога является возможность интуитивной работы с графическим материалом.

Электронный каталог предполагается использовать в курсовом и дипломном проектировании в области тепловых и атомных электрических станций.

#### Литература

1. **Паротурбинные** установки атомных электростанций / Под ред. Ю. Ф. Косяка. – М.: Энергия, 1978.
2. **Трухний А.Д.** Стационарные паровые турбины. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкция турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. **Дейч М.Е.,** Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. – М.: Машиностроение, 1965.
5. **Трояновский Б.М.** Турбины для атомных электростанций. – М.: Энергия, 1978.

## Эксплуатация и химконтроль импортных ионитов на электростанциях

При входном контроле ионообменных смол производства КОО «Азот» с 1998 года стала наблюдаться нестабильность технических характеристик, чаще всего по осмотической стабильности, объёмной доле рабочей фракции и полной статической обменной ёмкости.

В 1999 году на Смоленской АЭС была выполнена работа по обобщению и анализу опыта эксплуатации отечественных и импортных ионитов.

Высокой оценки заслуживает слабоосновный анионит Purolite A845, который использовался на первой ступени ХВО вместо слабоосновного анионита АН-31 в течение 6 лет, за весь наблюдаемый период фильтроцикл составлял 3800–4000 м<sup>3</sup>. В 2001 году анионитные фильтры первой ступени ХВО были загружены новой модификацией слабоосновного анионита – Purolite A847. По сравнению со смолой А-845 отмечается увеличение фильтроцикла в 2,5 раза.

По результатам выполненного анализа опыта эксплуатации отечественных и импортных ионитов на САЭС, анализа результатов входного контроля образцов и в соответствии с «Перечнем ионитов, разрешённых для применения на АЭС», утверждённым концерном «Росэнергоатом» 27.10.99, на САЭС была подобрана номенклатура высококачественных импортных ионообменных смол для замены отслуживших загрузок фильтров. Был составлен график замены отработанных смол на период с 1999 года по 2007 год.

Выбор смол для фильтров конденсатоочисток определялся следующими факторами:

1. Конденсатоочистки – основные системы, обеспечивающие требование качества основного технологического контура энергоблока АЭС с РБМК.

2. Конденсат, поступающий на очистку, содержит грубодисперсные, коллоидные и растворённые примеси, которые поступают из таких источников, как присос охлаждающей воды в конденсаторах турбин, коррозия поверхностей нагрева парового и конденсатно-питательного трактов, подпиточная вода.

3. Для конденсатоочистки характерен большой расход очищаемого конденсата.

4. Температура конденсата часто приближается к предельным значениям для ионообменных смол.

5. При очистке конденсата преследуется двоякая цель: удаление взвешенных частиц путём фильтрования и удаление растворённых веществ при помощи ионного обмена.

## **Автоматический химический контроль теплоносителя на ТЭС и АЭС с использованием измерений рН и электропроводности**

Конец 20-го века отмечен бурным развитием информационных технологий на базе микропроцессорной техники. Одним из направлений этого развития является сбор, обработка и представление информации о состоянии технического объекта, в том числе энергоблока тепловой и атомной электростанции. Одним из наиболее сложных аспектов данного направления является сбор и представление информации о состоянии водного теплоносителя, подверженного влиянию организованных (дозировки аммиака, фосфатов) и неорганизованных (присосы воды в конденсаторах турбин, изменение качества добавочной воды) воздействий.

Другим направлением развития микропроцессорной техники является появление нового класса приборов автоматического химконтроля качества воды на ТЭС, прежде всего кондуктометров и рН-метров, обладающих высокой разрешающей способностью, точностью измерений, средствами самодиагностики и обработки данных, устройствами связи с центральным процессором.

В последние годы на тепловых и атомных электрических станциях большое внимание уделяется разработке систем автоматического химконтроля нового поколения, использующих измерение электропроводности и рН для косвенного определения концентраций аммиака, хлоридов, щёлочности и др. в охлажденных пробах питательной воды и пара. На основе таких измерений создаются новые системы химического контроля и диагностики состояния водного химического режима энергоблоков.

Проблемы химического контроля на базе измерения электропроводности и рН, результаты исследований и промышленных испытаний изложены в издаваемой в 2007 году монографии с названием «Автоматический химконтроль теплоносителя на ТЭС с использованием измерений электропроводности и рН». В данной книге представлены результаты исследований, выполненных в разные годы химико-энергетической школой ИГЭУ как самостоятельно, так и в сотрудничестве с МЭИ (ТУ).

Приводятся результаты исследований, полученные на лабораторном стенде и в промышленных условиях, в том числе, по выносу органических веществ в пар испарительных установок. Дан обзор методов и предложена оригинальная методика определения концентрации потенциально-кислых веществ в питательной воде на базе измерения электропроводности охлажденных проб воды и пара прямоточного энергетического котла.

Книга предназначена инженеров и научных работников в области химических технологий на ТЭС и АЭС и может быть полезной для студентов теплоэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.321.

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор, Е.В. КОЗЮЛИНА, к.т.н., ст. преподаватель,  
А.Р. ГОРНУШКИН, к.т.н., С.В. КИЕТ, аспирант  
(ИГЭУ-МЭИ)

## Алгоритм расчета показателей качества питательной воды прямоточных котлов

Предложенный в предыдущих работах метод косвенного определения концентраций минеральных примесей питательной воды прямоточных котлов хорошо работает по определению концентрации аммиака и присосов охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин энергоблоков [1]. Однако отмечались повышения концентрации ионов натрия, а при расчетах водного режима без дозирования аммиака возникали проблемы в реализации расчетной методики.

Опытные исследования качества теплоносителя на энергоблоках Конаковской ГРЭС показали необходимость уточнения методики, путем учета остаточной щелочности в анализируемой пробе, пропущенной предварительно через Н-катионированную колонку. Такой учет реализуется первоначальным заданием соотношения бикарбонатов и хлоридов в Н-пробе; в пределах 0,01–1,0 с последующим уточнением.

Тогда, концентрация хлоридов определяется выражением (при  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$[\text{Cl}^-] = \frac{1000 \cdot \chi_{\text{H}}}{426,2 \cdot a_1 \cdot (1+n) + 126,5 \cdot (1+n) \cdot (1-a_1) - 31,9 \cdot n}$$

где  $a_1=0,90 \div 0,99$  – параметр, характеризующий глубину ионного обмена на Н-колонке. Результаты реализации расчетной методики по «новому» методу приведен в таблице 1.

Полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами выборочных лабораторных анализов и позволяют использовать «новую» расчетную методику в широком диапазоне качества питательной воды прямоточных энергетических котлов.

**Таблица. Результаты расчета нормируемых показателей по измерению удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы и величины pH**

Измеренные величины			Рассчитываемые величины			
$\chi_{\text{H}}$ , мкСм/см	$\chi_{\text{H}}$ , мкСм/см	pH	$[\text{NH}_3]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$[\text{Na}^+]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$[\text{Cl}^-]$ , мкг/дм <sup>3</sup>	$\text{Щ}_0$ , мкг-экв/дм <sup>3</sup>
5,50	0,60	9,05	678,7	33,4	51,3	19,6
4,85	0,82	8,95	547,5	45,4	69,8	17,0
0,44	0,25	7,09	24,2	14,0	22,0	1,3
0,53	0,09	7,85	34,5	4,5	7,2	1,8
0,47	0,11	8,09	29,9	5,5	8,7	1,6
0,15	0,19	6,78	0	6,1	8,4	0
0,21	0,27	6,90	0	9,8	12,2	0,1

### Литература

1. Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Козюлина Е.В. Повышение информативности мониторинга водного режима конденсатно-питательного тракта энергоблока // Теплоэнергетика. – 2003. – №7. – С. 2-7.

УДК 621.187.11

Е.Н. БУШУЕВ, к.т.н., доцент, А.Б. ЛАРИН, к.т.н., Н.В. БУШУЕВА, ст. преподаватель (ИГЭУ)

## Система обработки данных по регенерациям ионитов с использованием измерения электропроводности

В условиях промышленной эксплуатации водоподготовительной установки химический контроль исходных регенерационных растворов и стоков ионитных фильтров проводится в периоды пуско-наладочных испытаний с целью определения оптимальных расходов реагентов на регенерацию и сорбционных обменных емкостей ионитов, а также количества веществ сбрасываемых со сточными водами.

Особенностями химконтроля за процессом регенерации ионитных фильтров промышленных установок является большое количество отобранных проб (до 20–30 и более за короткий промежуток времени 2–3 часа), а также необходимость их оперативного анализа по нескольким показателям. В этих условиях становится актуальной задача получения достоверных анализов представительных проб быстроизменяющейся среды.

Авторами составлена расчетная методика, позволяющая при минимальном «ручном» химконтроле и приборном измерении электропроводности при регенерации H-, Na-катионита или OH-анионита косвенным методом определить концентрации ионов в анализируемом стоке. Так, например, для щелочного стока концентрация десорбируемых анионом сильных кислот при i-м замере определяется, мг-экв/л,

$$\sum A c_i^{\text{щс}} = [\text{SO}_4^{2-}]_i^{\text{щс}} + [\text{Cl}^-]_i^{\text{щс}} \approx \frac{1000 \chi_{\text{щс},i} - \Lambda_{\text{NaOH}} \Psi_{r,i} - \Lambda_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \Psi_{\text{к},i}}{\Lambda_{\text{NaCl}}},$$

где  $\chi_{\text{щс},i}$  – удельная электропроводность щелочного стока, мСм/см  $\Psi_{r,i}$ ,  $\Psi_{\text{к},i}$  – аналитически измененные гидратная и карбонатная щёлочности в стоке соответственно, мг-экв/л;  $\Lambda_{\text{NaOH}}$ ,  $\Lambda_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ ,  $\Lambda_{\text{NaCl}}$  – эквивалентные электропроводности соответствующих веществ, См·см<sup>2</sup>/г-экв. Значения  $\Lambda_i$  определяются по методике, разработанной на кафедре ХХТЭ, и учитывающей влияние на  $\Lambda_i$  температуры и состава раствора.

На основе опытных и расчетных концентраций строится выходная кривая регенерации. Количество десорбированных ионов в ходе регенерации численно равно площади под этой кривой и осью абсцисс, и которая может быть найдена как сумма трапеций построенных на основе опытных точек. Более точные результаты могут быть получены при составлении интерполяционного многочлена.

Разработанная методика была реализована в виде программного продукта, который позволяет оперативно в условиях эксплуатации получать исчерпывающую информацию об основных технологических характеристиках регенерации ионитного фильтра.

УДК 621.187.11

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор, Е.Н. БУШУЕВ, к.т.н., доцент,  
А.Б. ЛАРИН, к.т.н., ст. преподаватель  
(ИГЭУ)

## Составление эмпирических формул по расчету рабочих обменных емкостей импортных ионитов

Для загрузки ионообменных фильтров водоподготовительных установок ТЭС и АЭС ежегодно приобретается 6–7 тыс. тонн отечественных и 2,2–2,8 тыс. тонн импортных ионообменных смол, стоимость которых превышает 20 млн долларов США.

Появилось большое количество разных марок ионитов. Фирмы производители предоставляют технические бюллетени, в которых в графическом и табличном виде представлены характеристики ионитов в зависимости от значительного количества влияющих факторов: качества обрабатываемой воды, условий регенерации, остаточных концентрации ионов и т.д., что создает трудности в их использовании.

Авторами проведена обработка данных и получены эмпирические зависимости по расчету рабочих обменных емкостей и остаточных концентраций сорбируемых ионов для ряда ионитов фирм «Purolite», «Rohm&Haas», «Bayer» и «Dow Chemical». Так, например, эмпирическая формула, полученная авторами, по расчёту рабочей обменной ёмкости для анионита Amberlite IRA-67, г-экв/м<sup>3</sup>, имеет вид:

$$E_{\text{раб}}^{\text{IRA-67}} = E_{\text{раб}}^0 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot 10^3;$$

$$E_{\text{раб}}^0 = 0,0013 \frac{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{ex}}}{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{ex}} + [\text{Cl}^-]_{\text{ex}}};$$

$$A = 0,00242 \frac{[\text{CO}_2]_{\text{ex}}}{\Sigma A_n} + 0,8788;$$

$$B = -\frac{0,535}{t_{\text{г}}} + 2,766 \cdot 10^{-3} t_{\text{г}} + 0,993;$$

$$C = \begin{cases} 1,019 - \frac{0,473}{T}, & \text{если } T \leq 24 \\ 1 & \text{если } T > 24, \end{cases}$$

где  $E_{\text{раб}}^0$  – полная обменная емкость анионита, г-экв/м<sup>3</sup>;  $[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{вх}}$ ,  $[\text{Cl}^-]_{\text{вх}}$ ,  $\Sigma A_n$  – концентрации соответственно сульфатов, хлоридов и всех анионов в обрабатываемой воде, мг-экв/дм<sup>3</sup>;  $[\text{CO}_2]_{\text{вх}}$  – концентрация углекислоты, мг/дм<sup>3</sup>;  $t_{\text{г}}$  – температура обрабатываемой воды, °С;  $T$  – время работы до истощения, ч.

Формула описывает данные из технического бюллетеня фирмы «Rohm and Haas» с максимальной погрешностью 1,74 %, со средней – 0,7 % и может использоваться в практических расчетах при проектировании и анализе эксплуатационных данных.

УДК 621.187.11

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор, Е.Н. БУШУЕВ, к.т.н., доцент,  
М.К.Л. БАТТИ, инженер  
(ИГЭУ)

## **Определение концентрации кислых продуктов термолиза органических веществ в питательной воде прямоточных котлов**

Питательная вода прямоточных котлов СКД характеризуется почти полным отсутствием минеральных примесей и присутствием небольшого количества органических веществ. Последние поступают в питательную воду с основным конденсатом (нефтепродукты, присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин и сетевой воды в сетевых подогревателях, продукты деструкции ионитов БОУ) и с добавочной водой. Наиболее вероятным продуктом термолиза органических веществ является уксусная кислота. Появление уксусной кислоты и других веществ кислого характера в паре прямоточных котлов является причиной коррозионных повреждений теплового оборудования.

Существующие методы определения органики основаны на применении дорогих и сложных в эксплуатации приборов (например, автоматического ионного хроматографа).

Анализ измерений удельной электропроводности и рН в питательной воде и паре прямоточных котлов ряда ТЭС показывает, что с переходом от питательной воды к пару, удельная электропроводность проб (или удельная электропроводность Н-катионированных проб, если производится дозирование аммиака в питательную воду) увеличивается от 0,05 до 0,20 мкСм/см, а рН проб уменьшается на 0,1–0,3 единиц. Такие изменения носят устойчивый характер и относятся за счет термолиза органических примесей питательной воды.

Авторами предложена математическая модель, на основе которой составлена расчетная методика, позволяющая на базе измерений удельных электропроводностей Н-катионированных проб питательной воды ( $\chi_{\text{H}}^{\text{пв}}$ ) и острого пара ( $\chi_{\text{H}}^{\text{оп}}$ ) прямоточного котла определить концентрации кислых продуктов термолиза органических примесей в пересчете на концентрацию уксусной кислоты. Получена зависимость, позволяющая оценить эту концентрацию, мг/дм<sup>3</sup>, в виде:

$$C_{\text{CH}_3\text{COO}^-} = 153,6(\chi_{\text{H}}^{\text{оп}} - \chi_{\text{H}}^{\text{пв}}).$$

Проверка предложенной зависимости проводилась в лабораторных условиях. Расчетные значения  $C_{\text{CH}_3\text{COO}^-}$  в среднем на 15 % отличаются от измеренных. Способ использовался для расчетной оценки концентрации потенциально кислых веществ в питательной воде энергоблоков Конаковской и Пермской ГРЭС. Полученные при этом результаты согласуются с данными исследований, приведенными в литературе.

УДК 621.187.11

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор, А.Б. ЛАРИН, к.т.н., ст. преподаватель,  
Е.Н. БУШУЕВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Метод высокотемпературной калибровки кондуктометра для измерения электропроводности глубокообессоленной воды**

Требования к качеству добавочной (обессоленной) воды энергоблоков очень высоки и постоянно ужесточаются. Для энергоблоков СКД добавочная вода должна иметь удельную электропроводность не более 0,2 мкСм/см. Такая вода приближается к абсолютно чистой воде, и измерение ее электропроводности требует особой калибровки кондуктометра. Используемый в настоящее время метод калибровки по стандартному раствору в условиях сверхчистых вод дает высокую погрешность. Особенно чувствительны к таким ошибкам системы диагностики и контроля за состоянием водно-химического режима прямоточных котлов.

Сложность калибровки кондуктометра заключается в том, что нет методов аналитического определения в такой сверхчистой воде малых концентраций ионных примесей, что позволило бы отделить солевую составляющую в измеренной электропроводности от электропроводности самой воды.

Сущность предлагаемого метода состоит в том, что с ростом температуры резко увеличивается удельная электропроводность абсолютно чистой воды, так, что при температуре 100 °С вклад этой составляющей в измеренную величину электропроводности оставляет 80–90 %, при 25 °С лишь около 5 %. Такое повышение объясняется, во-первых, более значительным увеличением эквивалентных электропроводностей иона водорода и гидроксил-иона по сравнению с эквивалентными электропроводностями ионов солевой составляющей. Во-вторых, константа диссоциации воды с повышением температуры резко возрастает, а значит пропорционально возрастают концентрации ионов диссоциации воды. Таким образом, при высокой температуре (80–100 °С) влияние солевой составляющей на электропроводность снижается, что ведет к уменьшению ошибки, связанной с установкой «нулевой точки» при калибровке.

Представленный метод калибровки довольно просто может быть реализован в промышленных условиях, используя штатное устройство подготовки пробы на питательной воде и паре энергетических котлов СКД при изменении степени охлаждения анализируемой пробы. Датчик кондуктометра выполнен из нержавеющей стали и может работать при температурах до 100 °С.

После такой калибровки дальнейшие измерения можно проводить по традиционной технологии с приведением измеренного значения удельной электропроводности к 25 °С.

УДК 621.311

В.Б. ЛУКИНА, к.х.н., доцент, А.Е. МАЛЫГИН, М.А. МАХАЕВА, студ.  
(ИГЭУ)

## **Состояние проблемы анализа органических соединений в технологических водах теплоэнергетических установок**

Изучение качественного и количественного состава органических примесей в природных водах представляет очень актуальную проблему в водоподготовке.

Наиболее характерными органическими примесями, попадающими в пароводяной тракт электростанций, являются гуминовые соединения, вещества белковой природы, различные углеводороды, углеводы, сложные эфиры, кислоты жирного ряда, а также трудноидентифицируемые продукты, образующиеся в качестве побочных веществ при синтезе ионообменных смол. Многие из них являются потенциально-кислыми веществами, понижающими рН среды при их термолизе в теплоэнергетических установках.

Разнообразие органических соединений предопределяет очень большие сложности их идентификации в воде.

В энергетике России принято применять для количественного определения содержания органических примесей «метод перманганатной окисляемости». Главным недостатком этого метода является его низкая чувствительность и невозможность, вследствие этого, определять содержание органических примесей уже на последних ступенях подготовки воды. Кроме того, на результат анализа заметное влияние оказывает содержание хлорид-ионов в испытуемой воде. Так, в частности, при проведении анализов окисляемости природной воды перманганатным методом, как в условии лабораторий ТЭС, так и в условиях лаборатории ИГЭУ была выявлена значительная несходимость результатов анализа. При выяснении причин нами, например, было обнаружено влияние качества воды, разбавляющей пробу, на точность анализа. В качестве разбавляющей воды были исследованы дистиллированная вода, бидистиллят и вода с повышенной степенью обессоливания.

В заключении отметим, что сложность проблемы вызвала многочисленные и разнообразные по подходам попытки очистки воды от органических примесей, а также методов их химического качественного и количественного анализа в природных и технологических водах.

Однако до сих пор нет единодушия в приоритетах как в методах удаления, так и в методах анализа примесей органических веществ в воде.

УДК 621.187

Н.А. СТРЕБКОВА, аспирант  
(МЭИ (ТУ))  
Л.К. ГОНЧАРОВА, к.х.н., доцент  
(Филиал МЭИ, г. Волжский)

## Изучение процессов сорбции и десорбции органических соединений на ионитах Амберлайт IRA – 958 и IRA – 900

Ионообменные материалы, используемые на ВПУ тепловых электростанций, зачастую подвергаются необратимому загрязнению органическими и железосодержащими соединениями, что приводит к значительным экономическим потерям.

В последнее время для повышения эффективности удаления из вод органических соединений предлагается применять аниониты-органопоглотители и мембранные технологии.

В связи с этим в лабораторных условиях проводилось определение основных параметров, характеризующих работу макропористых анионитов-органопоглотителей акрилового IRA-958 и стирольного IRA-900 на поверхностной воде, содержащей значительное количество гумусовых соединений, после ее предварительной очистки известкованием-коагуляцией и Na - катионирования.

Фильтрат после Na-катионирования, имевший следующие показатели качества: рН=10,20-10,54, Ж<sub>о</sub>=0,2-0,3 мг-экв/дм<sup>3</sup>, Cl=20-29 мг/дм<sup>3</sup>, Щ<sub>о</sub>=0,8-1,2 мг-экв/дм<sup>3</sup>, Fe=0,08-0,58 мг/дм<sup>3</sup>, Ох=13,6-18,4 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, пропускался через колонки с анионитами-органопоглотителями со скоростью 10 м<sup>3</sup>/ч. После колонок определялись те же показатели - рН, Cl<sup>-</sup>, Щ<sub>о</sub>, Fe и О<sub>к</sub>. Регенерация проводилась раствором 10 % NaCl + 2 % NaOH, в регенерантах определялись окисляемость и железо, а затем рассчитывалась величина десорбции органических соединений и железа.

Сорбция органических соединений в течении фильтроциклов составляла для IRA-958 от 80 % до 70 %, а для IRA-900 до 80 % от количества органических соединений, поступивших на аниониты. Сорбция железа в течении фильтроциклов для обоих анионитов колеблется в пределах от 20 и до 100 %.

Десорбция органических соединений для анионитов IRA-958 и IRA-900 составляла соответственно 90-80 % и 86-80 %, а железо десорбируется максимум на 19 %. Т.е. часть органических соединений и практически полностью железо не удаляются при регенерации, накапливаются от цикла к циклу, что приводит к загрязнению и отравлению анионитов и снижению обменной емкости.

## **Результаты экологического аудита Костромской ГРЭС**

В соответствии с Рабочей программой экологического аудита филиала ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС» была выполнена проверка соответствия производственной деятельности Костромской ГРЭС, осуществлявшейся в 2005 году, требованиям нормативных документов. В ходе проверки было проверено 17 видов производственной деятельности. По результатам проверки сделаны следующие выводы:

1. В целом деятельность филиала ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС» в 2005 году осуществлялась в соответствии с действующим природоохранным законодательством РФ:

- на предприятии имеется вся необходимая нормативно-техническая документация (нормативы ПДВ, ПДС, ПНООЛР, лицензии);
- разработан и утвержден план действий по предотвращению аварийных ситуаций и мероприятия по ликвидации в случае их возникновения;
- ежегодно оформляются разрешения на сбросы загрязняющих веществ (ЗВ), выбросы в атмосферу;
- имеются согласования размещения отходов;
- установлены лимиты сбросов ЗВ в водные объекты и выбросов ЗВ в атмосферу.

2. При сложившемся за последние годы уровне выработки электрической энергии и соотношении топлива газ-мазут валовые выбросы загрязняющих веществ составляли 15-22% от предельно-допустимого количества.

3. Объемы водопотребления и водоотведения за рассматриваемый период не превышали установленных лимитов. В то же время лимиты водопотребления на период 2006-2008 гг., установленные Федеральным агентством водных ресурсов по факту 2004-2005 гг., не менее, чем на 50% ниже проектных объемов водопотребления и могут быть превышены при дальнейшем увеличении выработки электроэнергии.

По результатам проверки филиалу ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС» даны следующие рекомендации:

1. Согласовать с Федеральным агентством водных ресурсов возможность изменения установленных лимитов водопотребления в сторону их увеличения при увеличении выработки электроэнергии.
2. Продолжать работы по определению эффективности системы рыбозащиты в акватории подводящего канала Костромской ГРЭС с целью её регистрации как рыбозащитного сооружения.
3. Систематически включать в план обучения персонала повышение квалификации сотрудников в области охраны окружающей среды.

## К вопросу решения балансовых задач в системах оперативного управления

Для эффективной организации оперативного управления необходимо иметь достоверную информацию о значениях наблюдаемых (измеряемых) и расчётных параметров, одна часть которых относится к технико-экономическим показателям, а другая - к технологическим параметрам, датчики для измерения которых по тем или иным причинам отсутствуют. Решить эту задачу позволяет проведение балансовых расчётов. Вместе с этим требуется обеспечить метрологическое качество полученных результатов, на что существенное влияние оказывает метод решения системы балансовых уравнений.

Основные сложности при решении системы балансовых уравнений обусловлены тем, что число переменных значительно превышает число уравнений. В случае задания части термодинамических и расходных параметров схемы, избыточных по отношению к системе уравнений, решение этой системы будет однозначным. Но необходимо учитывать, что термодинамические и расходные параметры в процессе расчёта балансов могут принимать лишь такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области.

Среди многочисленных методов решения балансовых задач можно выделить три основные группы: матричные, экстремальные (оптимизационные) и графовые методы. Матричный метод решения балансовой задачи требует представить систему уравнений в виде ориентированного графа. Узлы графа будут соответствовать элементам технологической схемы, дуги – материальным и (или) энергетическим потокам между элементами, причём направление дуг даст информацию о направленности потока. Формализованным описанием такого графа является так называемая матрица инцидентности. Основным недостатком матричного метода являются трудности, связанные с инвертированием матриц. Ещё одним существенным недостатком является отсутствие возможности учёта системы ограничений.

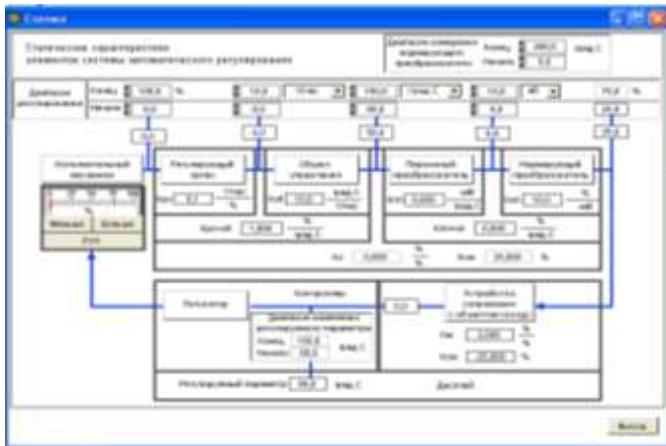
Среди экстремальных методов для расчёта сложных нелинейных систем уравнений наибольшее распространение получили численные итерационные методы и методы теории оптимизации. Достоинством наиболее сложных экстремальных методов является возможность учёта системы ограничений.

Графовые методы позволяют предварительно (исходя из полноты имеющейся информации и структуры системы уравнений) провести планирование вычислительного процесса. В целом это приводит к необходимости реализации итерационных процедур расчёта с минимизацией невязок заранее выделенных (назначенных) параметров.

## Расчет параметров алгоритма ввода аналоговых сигналов для статических объектов теплоэнергетического оборудования

На рисунке представлена структура технической реализации одноконтурной системы автоматического регулирования, состоящей из релейно-импульсного регулятора, устройства сопряжения с объектом, исполнительным механизмом постоянной скорости вращения, регулирующего органа, объекта управления, первичного и нормирующего преобразователей.

Целью расчета является определение величины коэффициента масштабирования  $K_M$  и смещения  $X_{CM}$  в алгоритме ввода аналоговых сигналов контроллера.



В таблице приведены исходные данные по элементам системы автоматического регулирования температуры перегретого пара.

Элемент системы	Ед. изм.	Диапазон измерения	
		Начало	Конец
Исполнительный механизм	%	0	100
Регулирующий орган	т/ч	0	20
Объект управления	С°	550	510
Первичный преобразователь	мВ	-	-
Нормирующий преобразователь	С°	200	600

В результате расчета для алгоритма ввода аналогового сигнала контроллера получим  $K_M = -10$ ,  $X_{CM} = -87,5$  %.

УДК 518.5

В.Д. ТАЛАНОВ, к.т.н., профессор, Е.Л. АРХАНГЕЛЬСКАЯ, ассистент (ИГЭУ)

## Моделирование системы теплоснабжения

Система теплоснабжения состоит из двух контуров (рис.1). Первый контур включает в себя водогрейный котел (1), пластинчатый теплообменник (2) и циркуляционный насос (3). Второй контур включает в себя сетевые насосы (4) и пластинчатый теплообменник, в котором сетевая вода, подогревается котловой водой первого контура. Регулирование температуры сетевой воды в прямом трубопроводе осуществляется трехходовым краном, в соответствии с сетевым графиком, за счет перепуска части котловой воды помимо теплообменника в узел смешения (5). Регулирование температуры котловой воды осуществляется за счет открытия/закрытия газовой заслонки котла.

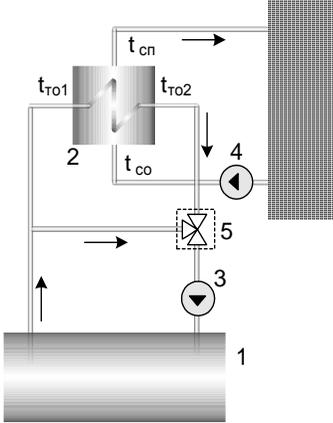


Рис. 1. Схема двухконтурной системы теплоснабжения

Модель реализована в среде графического программирования LabView фирмы National Instruments по принципу модульного построения структуры системы. Для создания адекватных моделей были разработаны модели основных элементов промышленных систем регулирования. Испытания модели (рис.2) показали, что все системы регулирования работают устойчиво. Модель адекватна реально функционирующей котельной. Технологические параметры при различных нагрузках соответствуют режимной карте.

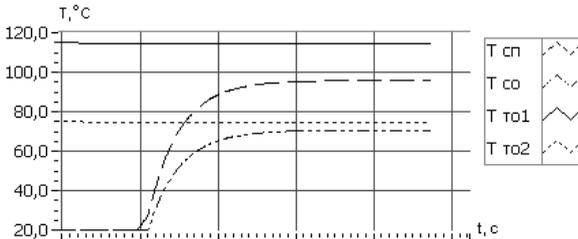


Рис. 2. Переходный процесс для разогрева сетевой воды при температуре наружного воздуха – 31 °С

УДК 621.187

Д.Б. СИЛУЯНОВ, к.т.н., доцент, Б.П. СИЛУЯНОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

## **Определение параметров сигналов частотными методами**

Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей предписывается оперативно контролировать концентрации ионов водорода, ионов натрия и растворенного кислорода. Показатель концентрации ионов водорода (рН) является важнейшей характеристикой воды. Автоматизированный химический контроль должен обеспечивать непрерывное и надежное получение нормируемых параметров водно-химического режима путем прямого измерения соответствующих показателей.

Доказано, что если пропускать через раствор, импульсы напряжения определенной формы, то первоначальная форма импульсов будет искажена. Поэтому представляется возможным определить свойства теплоносителя в зависимости от степени искажения формы опорного сигнала.

Очевидно, что обработка выходного сигнала невозможна без применения средств микропроцессорной техники. Для успешного определения значений контролируемого параметра во всем диапазоне измерений необходимо иметь семейство градуировочных зависимостей, соответствующих некоторым опорным значениям измеряемой величины. Определение промежуточных значений измеряемой величины может быть произведено с использованием интерполяционных методов.

Была исследована работа алгоритмов, выполняющих кусочно-линейную и полиномиальную интерполяцию, а также сплайн-интерполяцию полиномами второго и третьего порядка. Показано, что наибольшую точность обеспечивает интерполяция сплайнами третьего порядка.

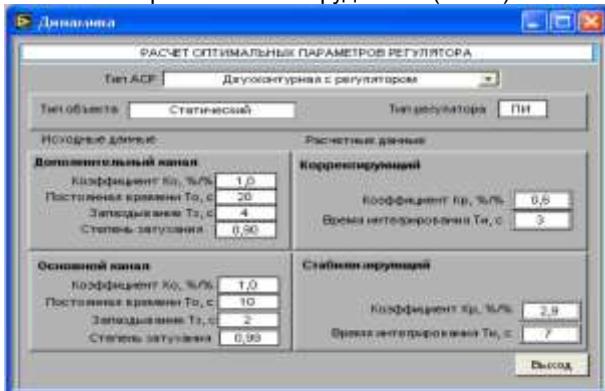
Проведены исследования определения значения рН по спектральному сигналу датчика с использованием амплитудной модуляции. Амплитудная модуляция позволяет передавать информацию от нескольких датчиков одновременно по одному каналу путем частотного разделения каналов, при котором сигналы разных датчиков занимают не перекрывающиеся полосы частот. Ширина спектра амплитудно-модулированного сигнала вдвое больше максимальной частоты модулирующего сигнала  $\Delta\omega = 2\omega$ . Спектры двух боковых полос несут одну и ту же информацию, поэтому одну из боковых полос можно удалить. Спектр однополосного сигнала будет в два раза уже.

УДК 518.5

С.Б. ПЛЕТНИКОВ, ст. преподаватель, С.В. ТАЛАНОВ, студент (ИГЭУ)

## Модуль расчета параметров регулятора для статических объектов теплоэнергетического оборудования

Видеокадр интерфейса модуля расчета параметров регулятора для статических объектов теплоэнергетического оборудования (МРПР) показан на рисунке.



В модуле используется метод расчета параметров настройки регулятора с помощью РКЧХ, связанной с корневым показателем колебательности. Модуль позволяет получить параметры настройки для трех типов АСР: одноконтурной, каскадной с исчезающим сигналом из промежуточной точки и каскадной с корректирующим и стабилизирующим регуляторами. В таблице представлены результаты вычисления модуля МРПР и программы ПАРУС (ИГЭУ, Кондрашин А.В.). Программы выдают сопоставимые параметры регуляторов.

Одноконтурная система		
Параметры объекта	МРПР	ПАРУС
$K_p=1 \text{ \%/\%}$ , $T_o=20 \text{ с}$ , $T_z=4 \text{ с}$	$K_p=4,8 \text{ \%/\%}$	$K_p=4,82 \text{ \%/\%}$
Степень затухания 0,75	$T_n=12 \text{ с}$	$T_n=11,7 \text{ с}$
Каскадная система		
Стабилизирующий контур		
$K_p=1 \text{ \%/\%}$ , $T_o=10 \text{ с}$ , $T_z=2 \text{ с}$	$K_p=4,8 \text{ \%/\%}$	$K_p=4,82 \text{ \%/\%}$
Степень затухания 0,75	$T_n=6 \text{ с}$	$T_n=6,2 \text{ с}$
Корректирующий контур		
$K_p=1 \text{ \%/\%}$ , $T_o=20 \text{ с}$ , $T_z=4 \text{ с}$	$K_p=2,1 \text{ \%/\%}$	$K_p=2,1 \text{ \%/\%}$
Степень затухания 0,75	$T_n=1 \text{ с}$	$T_n=0,97 \text{ с}$

Модуль МРПР используется в учебном процессе при выполнении лабораторных работ по курсу «Технические средства автоматизации в теплоэнергетике, ч.2».

УДК 621.391.26

Д.Б. СИЛУЯНОВ, к.т.н., доцент, А.П. ИСАЧЕНКОВ, студент  
(ИГЭУ)

## **Научно-исследовательский стенд на базе контроллера Siemens S7-200**

Микроконтроллеры Siemens S7-200 предназначены для решения задач управления и регулирования в системах автоматизации. На базе этих контроллеров можно создавать как автономные системы управления, так и системы управления, работающие в общей информационной сети.

Научно-исследовательский стенд предназначен для обучения студентов основам программирования на языке низкого уровня и создания SCADA-систем.

Обучаемому предлагается реализовать различные типы задач: арифметические и логические операции, операции нелинейных и динамических преобразований входных аналоговых сигналов, различные типовые законы регулирования. Для этих целей используются специальные программные средства: V3.2 STEP 7 MicroWIN, V1.0E PC Access, LabVIEW 8.0.

Нижний уровень системы реализован в среде программирования STEP 7 MicroWIN – удобном и простом средстве разработки программ для микроконтроллеров Siemens S7. Связь контроллера с компьютером осуществляется с помощью кабеля PC/PPI, осуществляющего преобразование форматов интерфейсов RS-232 и RS-485.

Верхний уровень системы выполнен в среде графического программирования LabVIEW 8.0. В данной среде реализован виртуальный пульт оператора, с помощью которого обучающийся может управлять программой, которая загружена в контроллер (изменять значения переменных, параметров настройки регуляторов, значения входных сигналов, а также контролировать полученные результаты).

Связь между нижним и верхним уровнями реализована с помощью программы V1.0E Access.

УДК 518.5

А.Е. КОЧЕТКОВ, ст. преподаватель, А.В. ПУШКОВ, А.М. ТОРОПОВ, студент (ИГЭУ)

## **Разработка учебно–исследовательского стенда «Модель тепловой сети»**

Основной целью создания данного стенда является обучение студентов принципам построения АСУ ТП тепловых сетей на базе современных микропроцессорных средств регулирования с использованием SCADA – систем:

- изучение устройства и принципов действия современных средств измерения параметров теплоносителя (температуры, давления, расхода);
- изучение и сравнительная оценка различных методов измерения количества тепловой энергии;
- изучение способов регулирования количества тепловой энергии, отпускаемой потребителю;
- изучение структуры и функций АСУ ТП тепловой сети;
- разработка SCADA – системы для физической модели тепловой сети.

Основой стенда является физическая модель тепловой сети, состоящая из следующих основных элементов:

- модель источника тепловой энергии, включающая в себя водогрейный котел, сетевой насос и регулирующий клапан;
- модель потребителя тепловой энергии, представляющая собой пластинчатый теплообменник.

Для контроля параметров теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах используются следующие первичные преобразователи: термометры сопротивления ТСМ, тензометрические манометры Сапфир 22 и ультразвуковые расходомеры типа РУС-1. Аналого-цифровое преобразование сигналов первичных преобразователей осуществляется при помощи контроллера TECON ТКМ 410.

SCADA – система реализована в среде графического программирования LabView фирмы National Instruments. Ее основными функциями являются:

- отображение температуры, давления и расхода теплоносителя на мнемосхемах и трендах;
- регулирование расхода теплоносителя в ручном или автоматическом режиме;
- вычисление количества тепловой энергии, отпускаемой потребителю;
- архивирование данных;
- создание и печать отчета о ходе технологического процесса в автоматическом режиме или по запросу оператора.

## СЕКЦИЯ 6. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ

УДК 62-83:621.3.07

А.Б. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ)

### **Минимизация пульсаций электромагнитного момента в вентильно-индукторном электроприводе**

Задача минимизации пульсаций момента решается при следующих ограничениях: 1) рассматривается ограниченный набор вариантов структурного построения двигателя, различающихся числом фаз, конструктивные параметры которых получены в рамках традиционного (известного) подхода к проектированию; 2) минимизация пульсаций момента осуществляется за счет выбора формы заданного тока фазы.

Рассмотрены математические модели индукторных двигателей при независимом и зависимом управлении фазами, позволяющие выполнять расчет динамических и статических характеристик двигателя при его работе в составе вентильно-индукторного привода (ВИП) с различными схемами силовой части, конструкциями машины и алгоритмами управления.

Рассмотрена структура и алгоритмы управления  $m$ -фазным вентильно-индукторным электроприводом при независимом управлении фазами и 6-фазным приводом с общей точкой включения фаз. Представлена методика синтеза системы управления ВИП.

Произведено сравнение различных вариантов построения силовой части вентильно-индукторного привода при различных формах задания фазных токов с характеристиками асинхронного электропривода с векторным управлением, принятого в качестве эквивалента для сравнения. Сравнение показало:

- 6-фазный ВИП с общей точкой и синусоидальной формой токов задания целесообразно использовать при однозонном регулировании скорости,
- 3-фазный ВИП немного уступает 4-фазному по критерию минимума пульсаций момента при работе с разомкнутым контуром скорости, но имеет меньшее амплитудное значение тока фазы, приведенное к эквивалентной механической характеристике и равному числу фаз, что напрямую связано со стоимостью полупроводникового преобразователя.
- При работе ВИП в замкнутом контуре скорости уровень пульсаций электромагнитного момента в первой зоне регулирования скорости мало отличается от уровня пульсаций асинхронного электропривода с эквивалентным значением частоты переключения силовых ключей преобразователя.
- В исследованном диапазоне номинальных скоростей и мощности вентильно-индукторный электропривод уступает асинхронному электроприводу по критерию максимального отношения момента к амплитуде тока фазы.

## **Синтез алгоритмов пространственно-векторного управления матричным преобразователем частоты**

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) является одним из наиболее перспективных полупроводниковых преобразователей энергии с непосредственной связью источника и нагрузки для применения в тех случаях, когда требуется наличие режима рекуперации энергии в питающую сеть и предъявляются повышенные требования к качеству потребляемой и возвращаемой энергии. Его преимуществами относительно ПЧ с неуправляемым выпрямителем являются: двунаправленный обмен энергии между сетью и нагрузкой; возможность формирования синусоидального входного тока с единичным коэффициентом сдвига; отсутствие в силовой схеме конденсаторов большой емкости, высокий КПД и показатели электромагнитной совместимости с питающей сетью.

Рассмотрена методика синтеза алгоритмов управления МПЧ в рамках стратегии пространственно-векторного формирования ШИМ с жестко заданным законом коммутации, позволяющая синтезировать алгоритмы управления по следующим критериям: максимальное значение коэффициента использования напряжения; минимизация пульсаций выходного тока при заданной частоте переключений; минимизация числа переключений преобразователя в цикле модуляции; обеспечение желаемого уровня нелинейных искажений входного тока и выходного напряжения и другим важным показателям качества работы преобразователя.

В рамках представленной методики рассмотрен пример синтеза алгоритма управления МПЧ, обеспечивающего синусоидальный закон изменения входного тока с единичным коэффициентом сдвига относительно входного напряжения, синусоидальный закон изменения выходного напряжения при изменении его значения в пределах (0...0.867) от уровня напряжения питающей сети. Синтезированный алгоритм обеспечивает работоспособность МПЧ вплоть до предельно достижимого значения выходного напряжения с небольшими отклонениями формы входного тока и выходного напряжения от синусоидальной.

Выполнено математическое моделирование процессов в МПЧ с предложенными алгоритмами управления при его работе в составе асинхронного электропривода с разомкнутой и адаптивно-векторной системой управления. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность рассмотренной методики синтеза и алгоритмов управления. Решены проблемы технической реализации преобразователя.

УДК 62-83:621.3.072.6

А.Б. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент, И.Ю. КОЛОДИН, инженер,  
А.В. КИСЕЛЕВ, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Исследование алгоритмов обработки сигналов импульсных датчиков угловых перемещений**

Современные цифровые системы управления электроприводов оснащаются различными датчиками угловых перемещений, в том числе и импульсными. В этих системах опрос датчиков происходит с высокой частотой. По этой причине, при низких скоростях вращения вала двигателя импульсный датчик не может обеспечить необходимое угловое разрешение. Поэтому встает вопрос получения достоверных значений углового положения и скорости вращения вала двигателя в условиях отсутствия реальной информации с датчика.

Были рассмотрены три варианта решения этой проблемы. В качестве критерия работоспособности алгоритма был выбран нижний уровень скорости, при котором в сигнале скорости отсутствовали явные скачки и импульсы. Апробация алгоритмов проводилась на исследовательском стенде, разработанном НТЦЭ «Вектор».

Первый алгоритм – вычисление средней скорости между метками датчика методом заполнения. Этот подход удобен тем, что требует минимум математических вычислений и экономит вычислительную мощность микропроцессора. Минимальная скорость, при которой этот алгоритм работоспособен – 0.1 об/мин, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Второй вариант определения скорости вращения и угла поворота вала двигателя – использование наблюдателей состояния. Рассмотрены два типа наблюдателей состояния с первым порядком астатизма. В первом типе использовалась невязка по скорости. При высоких частотах этот алгоритм существенных преимуществ не выявил, по сравнению с выше изложенным алгоритмом. При измерении скорости вращения внизу диапазона регулирования для получения «гладкого» сигнала наблюдатель необходимо настроить на частоту пропускания неприменимую в динамичных системах управления.

Во втором типе наблюдателей в качестве невязки была введена разность между углом с импульсного датчика и его оценкой. Данный алгоритм оказался работоспособным в диапазоне скоростей вращения от 10 об/мин и выше.

Далее был рассмотрен наблюдатель состояния с автономной оценкой переменных механического движения. Минимальная скорость, при которой этот вариант вычисления скорости работоспособен – 1 об/мин.

В результате проведенных исследований удалось определить особенности и способы применения наблюдателей состояния для обработки сигналов импульсного датчика углового перемещения.

## **Исследование электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода**

Рассмотрена классификация помех, генерируемых в системе частотно-регулируемого электропривода (СЧРЭП), основные способы борьбы с ними, нормативные документы, регламентирующие показатели электромагнитной совместимости (ЭМС). СЧРЭП включает в себя питающую сеть (эквивалент сети), сетевой кабель, фильтр радиопомех (опция), линейный реактор (опция), преобразователь частоты, двигательный фильтр (опция), двигательный кабель, двигатель.

Процессы распространения помехи рассматриваются в однофазных эквивалентных схемах замещения трехфазных систем. Переход от трехфазных схем к их однофазным эквивалентам осуществляется на основе известных методов преобразования линейных RLC- цепей с учетом взаимных связей между ними. Прохождение дифференциальной и синфазной составляющих кондуктивных радиопомех рассматривается раздельно, так как пути их распространения различаются структурно и параметрически.

Рассмотрены вопросы исследования ЭМС СЧРЭП методом математического моделирования в части эмиссии кондуктивных радиопомех. Представлена общая схема распространения синфазных и дифференциальных помех, математические модели элементов системы электропривода и устройств измерения, примеры расчета параметров однофазных эквивалентных схем замещения элементов системы привода для синфазных и дифференциальных помех. Даны методики проведения экспериментов и анализа результатов, представлены результаты модельных и натуральных экспериментов.

Представленный подход к исследованию ЭМС позволяет:

1) выполнять анализ показателей ЭМС СЧРЭП уже на стадии проектирования, учитывая при этом параметры преобразователя частоты, соединительных кабелей, двигателя, питающей сети, сетевых и двигательных фильтров;

2) осуществлять корректный выбор помехоподавляющих устройств (фильтров) с известными параметрами либо синтез структуры и параметров фильтров для обеспечения желаемых показателей ЭМС в конкретных условиях работы системы электропривода;

3) исследовать чувствительность показателей ЭМС к вариациям параметров элементов, входящих в состав системы электропривода;

4) выполнять расчетную проверку системы электропривода с заданной конфигурацией и параметрами на предмет соответствия нормам эмиссии кондуктивных радиопомех, регламентируемым отечественными и международными стандартами.

УДК 62-83:621.3.07

А.Б. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент, А.Н. СИБИРЦЕВ, инженер,  
В.Л. ЧИСТОСЕРДОВ, к.т.н., доцент, И.Ю. КОЛОДИН, инженер,  
Д.А. МОНОВ, инженер  
(ИГЭУ)

## **Новые режимы работы и функциональные возможности электроприводов серии ЭПВ**

Одной из современных тенденций развития преобразовательной техники для регулируемого электропривода является постоянное расширение ее функциональных возможностей, режимов работы и интеллектуальных свойств. Широко распространенными в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе можно считать такие режимы, как автоматическая настройка на параметры двигателя, режим энергосбережения, пуск на вращающийся двигатель с поиском частоты вращения, торможение постоянным током, автоматическое ограничение темпа торможения, управление по циклограмме в относительном и реальном времени. Ряд преобразователей оснащен интерфейсом с персональным компьютером, с различными типами датчиков угловых перемещений, поддерживают функции программирования пользователем, стандартные каналы связи и протоколы обмена с микропроцессорными устройствами. Введение новых объектно-ориентированных опций позволяет расширять область применения привода, снижать себестоимость проектов автоматизации промышленных установок и технологических комплексов, в частности, за счет переноса функций внешнего контроллера на программно-аппаратные средства преобразователя.

В дополнение к вышеуказанным функциональным возможностям преобразователи частоты (ПЧ) серии ЭПВ оснащены функциями управления за счет энергии торможения, мягкого переключения двигателя между ПЧ и питающей сетью, функцией защиты по динамической тепловой модели IGBT-модуля, могут комплектоваться программно-аппаратным модулем управления многодвигательной установкой.

Функция управления за счет энергии торможения обеспечивает работоспособность электропривода при временном пропадании напряжения питания и совместно с опцией «плохая сеть» существенно повышает устойчивость привода к нестабильности напряжения сети. Мягкое (без паузы на отключение питания) переключение двигателя между ПЧ и сетью выполняется за счет синхронизации выходного напряжения ПЧ с напряжением сети, что обеспечивает возможность кратковременной работы ПЧ параллельно с сетью. Использование этого режима в модуле управления многодвигательной установкой позволяет осуществлять регулирование технологического параметра путем изменения числа работающих двигателей и регулирования скорости одного из них от ПЧ с мягким переключением двигателя от ПЧ к сети. Функция защиты ПЧ по динамической тепловой модели IGBT-модуля позволяет повысить надежность и перегрузочную способность электропривода.

## **Применение векторной системы управления электрифицированным мотальным барабанчиком**

Применяемый в прядильном модуле автоматической центрифугальной машины АЦП-75 электрифицированный мотальный барабанчик для выборки пряжи из центрифуги, имеет в своем составе асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором обращенной конструкции, который получает питание от преобразователя частоты. Это позволяет перейти от централизованного электропривода к индивидуальному и использовать модульный принцип построения всей центрифугальной прядильной машины.

Также с применением статических законов управления асинхронным электродвигателем можно значительно повысить энергетические характеристики механизма перемотки, что значительно снижает потребление электроэнергии.

Для получения необходимых свойств пряжи при ее выборке из центрифуги должно обеспечиваться одно и то же значение натяжения нити. Это достигается путем поддержания постоянной скорости перемотки нити мотальным барабанчиком на патрон, вращающийся от соприкосновения с внешним ротором. Однако на скорость вращения механизма перемотки действуют не только натяжение нити, но и сила прижима патрона к барабанчику и момент инерции нарабатываемой паковки. Все эти факторы приводят к снижению скорости вращения механизма перемотки, и, как следствие, снижению скорости перемотки пряжи. При этом должна снижаться скорость перемещения ните-раскладчика, работающего в реверсивном режиме, для синхронизации его работы с механизмом перемотки. Это приводит к потерям полезного времени, а также снижению производительности прядильной машины.

Для поддержания постоянной скорости вращения электрифицированного мотального барабанчика, предлагается использовать векторную систему управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором при его питании от преобразователя частоты. При этом должны быть синтезированы регуляторы векторной системы управления с ориентацией по вектору потокосцепления ротора и жестким алгоритмом модуляции выходного напряжения преобразователя частоты.

Благодаря этому могут быть обеспечены наилучшие динамические и статические свойства мотального барабанчика, наиболее простая структура системы управления, а также регулировка скорости намотки при разгоне для формирования необходимого натяжения пряжи в период разгона механизма перемотки.

УДК 62-83.01:621.313.323

В.Ф. ГЛАЗУНОВ, д.т.н., профессор, А.А. РЕПИН, аспирант  
(ИГЭУ)

## **Методика синтеза разрывного синергетического закона управления синхронным двигателем**

Современные автоматические системы электропривода (ЭП) строятся в подавляющем большинстве случаев на основе бесконтактных машин переменного тока. В этой связи все более широкое распространение получают синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Высокая надежность, высокая стабильность частоты вращения в сочетании с высокими энергетическими и массогабаритными показателями делают СДПМ незаменимыми при построении высокоточных прецизионных и широкодиапазонных приводов.

Для регулирования координат СДПМ чаще всего применяются методы разрывного управления, на основе которых в замкнутой системе при помощи т. н. «релейных регуляторов» организуется скользящий режим, позволяющий получить более высокие, чем при стандартной широтно-импульсной модуляции, динамические свойства ЭП и обеспечить малую его чувствительность к внешним возмущениям и изменениям внутренних параметров [1]. Вместе с тем, однако, следует отметить, что структура СДПМ как объекта управления до сих пор полагалась линейной, и возникала естественная необходимость в специальных мерах по учету и компенсации структурных нелинейностей.

В настоящее время продолжают успешно развиваться методы синергетического, «несилового» управления электромеханическими системами, основным и наиболее общим из которых стал метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [1]. Он открывает возможность получения разрывных векторных законов управления для широкого класса существенно нелинейных систем, позволяя избежать процедуры линеаризации, при которой обычно теряется значительная часть информации о свойствах реального объекта.

Робастность и адаптивность синтезируемых методом АКАР замкнутых систем обусловили актуальность применения указанного метода при разработке высокоэффективного нелинейного синергетического регулятора для ЭП с СДПМ. Как показало математическое моделирование, система управления с таким регулятором обеспечивает высокую стабильность скорости вращения при малой чувствительности к изменениям параметров двигателя и нагрузки на валу, что наглядно иллюстрирует принцип направленной самоорганизации и полностью соответствует синергетической концепции метода АКАР.

### **Литература**

1. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 440 с.

УДК 677.05:62-83

В.Ф. ГЛАЗУНОВ, д.т.н., профессор, М.А. СОЛОМАНИЧЕВ, аспирант,  
И.А. СМИРНОВ, студент  
(ИГЭУ)

## Разработка математической модели устройства стабилизации плотности намотки ткани

В отделочном производстве текстильной промышленности при намотке ткани в рулон необходимо регулировать ее натяжение [1]. В качестве одного из возможных вариантов решения задачи рассматривается устройство регулирования натяжения ткани, обеспечивающее стабилизацию плотности намотки.

В соответствии с поставленной задачей разработана функциональная схема данного устройства. Она содержит электроприводы ЭП1 подающего ткань и ЭП2 формируемого рулона, датчик натяжения ткани ВФ, блок задания входного натяжения ВЗФ, интегрирующий элемент И, импульсные датчики числа оборотов рулона ВН и длины наматываемого материала ВЛ, включающего измерительный ролик 1 и жестко связанный с ним датчик импульсов ВИ, ключевой импульсный элемент К1 и блок определения теоретического радиуса формируемого рулона ВРТ. Алгоритм работы предлагаемого устройства заключается в том, что на выходе импульсного элемента ВИ датчика длины ВЛ формируется последовательность из  $n$  импульсов за полный оборот измерительного ролика 1, что соответствует длине  $\Delta l$  наматываемой ткани. Разность  $\Delta R$  фактического радиуса  $R$  на выходе усилительного блока 2 и теоретического радиуса  $R_T$ , вычисляемого по закону Архимедовой спирали [2], подается на инвертирующий И, изменяющий с помощью блока ВЗФ уставку задающего натяжения  $F_3$ , обеспечивающего минимизацию  $\Delta R$ .

На основе функциональной схемы устройства, в среде имитационного моделирования Simulink программного продукта Matlab 6.5 разработана его математическая модель, позволяющая получить временные зависимости линейной скорости намотки ткани и ошибки по натяжению ткани  $\Delta F$  при различных законах изменения реального радиуса  $R$  рулона. Результаты имитационного моделирования в виде кривых переходных процессов в контуре регулирования натяжения ткани показали, что за время полного оборота рулона происходит минимизация значения ошибки  $\Delta R$ , обеспечивая тем самым стабилизацию плотности намотки ткани в рулон при принятом способе регулирования ее натяжения.

### Литература

1. Глазунов В.Ф., Соломаничев М.А. Моделирование аналоговой системы управления намоткой с учетом изменения радиуса рулона // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – №1. – С. 104-108.
2. Кутын А.Ю. Проектирование текстильных паковок рулонного типа и методы их воспроизводства. – Иваново; НПЦ «Стимул», 2006. – 210 с.

## Обеспечение ограничения переменных и робастности в электроприводах с нежесткой механикой

Высокие технические характеристики и, прежде всего, быстродействие современных электроприводов переменного тока обуславливают необходимость учета нежесткости кинематических связей при синтезе систем управления. Важными практическими задачами, которые должны быть решены еще на стадии проектирования систем электроприводов, являются ограничение значений механических переменных электропривода и обеспечение робастности системы [1].

Традиционные системы подчиненного регулирования легко решают задачу ограничения переменных внутренних контуров и просто настраиваются, но не могут обеспечить эффективное демпфирование колебаний скорости в переходных режимах систем электроприводов с нежесткой механикой. Системы управления, построенные на принципах модального управления, обеспечивают заданное качество переходных процессов, но не решают проблему ограничения значений переменных состояния и трудны в настройке.

Для системы регулирования скорости рабочей машины предложен нелинейный регулятор состояния переменной структуры [2], построение которого позволяет ограничить значения моментов, возникающих в механических передачах, и обеспечивает монотонность переходных процессов моментов. Разработанный алгоритм переключения структуры регулятора исключает скачки переменных при входе и выходе из ограничения.

Разработана методика оптимизации параметров предложенного регулятора состояния для обеспечения робастных свойств системы электропривода. При апробации этой методики получены аналитические выражения частотных характеристик и резонансных частот двухмассовой вязко-упругой электромеханической системы. На основе анализа частотных и временных характеристик системы электропривода выработаны рекомендации по настройке параметров регулятора, позволяющие существенно снизить колебательность регулируемых переменных при максимальных отклонениях параметров объекта.

### Литература

1. **Робастное** модальное управление динамическими системами / С.В. Тарыкин, В.В. Тютиков // Автоматика и телемеханика. – 2002. – №5.
2. **Система** управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – №2. – С.87-90.

## **Безредукторный синхронный электропривод лифта**

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция по применению частотно-регулируемого электропривода в механизмах перемещения кабины лифта. Только управление с помощью преобразователя частоты обеспечивает устранение ощутимых толчков при старте и остановке, точное позиционирование кабины, позволяет отказаться от использования двухскоростного лифтового двигателя, имеющего по сравнению с общепромышленным значительно большие габариты и вес. При этом повышается срок службы элементов механизма лифта – тяговых канатов, тормозных колодок, подвески противовеса.

Анализ возможных вариантов построения безредукторного привода показал, что наиболее эффективным решением является привод на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами, конструктивно смещенного с лебедкой. Для получения требуемых скоростей перемещения кабины лифта (0,6 .. 2,5 м/с) двигатель должен иметь очень низкую номинальную частоту вращения (40 .. 160 об/мин). Однако низкоскоростные асинхронные двигатели имеют низкий КПД и  $\cos \varphi \approx (0,4 \dots 0,5)$ , что проявляется в увеличении их размеров и веса. Гораздо лучшие характеристики имеют специализированные многополюсные синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Считается, что требованиям к динамическим характеристикам лифтовых приводов могут удовлетворять только векторно-управляемые электроприводы с датчиком на валу двигателя. Однако, наибольший интерес представляют электроприводы без датчика скорости, так как установка последнего существенно снижает надежность и увеличивает стоимость привода. В НТЦ Электропривода «Вектор» разработаны преобразователи частоты, специально предназначенные для работы в составе электроприводов лифтов и удовлетворяющие этим требованиям.

За счет использования адаптивно-векторных алгоритмов управления достигаются высокие показатели качества регулирования в системе электропривода без датчика скорости/положения. Полоса пропускания контура скорости составляет не менее 30 Гц, диапазон регулирования скорости – не менее 50 при коэффициенте неравномерности вращения на минимальной скорости не более 0,25. Наличие S-образного задатчика интенсивности обеспечивает плавное движение при разгоне и торможении привода. Поддержка коммуникационно-го протокола CANopen позволяет интегрировать привод в современные системы управления пассажирскими лифтами.

В результате испытаний были получены характеристики привода, полностью удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к безредукторному электроприводу кабины лифта.

## **К вопросу оценки эффективности использования электроприводного газоперекачивающего агрегата**

Вопросы сопоставления электрического и газотурбинного видов привода исследовались многими авторами и организациями, что в определенной степени свидетельствует о важности предмета исследования и трудности решения поставленной задачи. В тоже время, постоянно меняющиеся цены на оборудование, топливный газ и электроэнергию вызывают необходимость периодического возобновления технико-экономических расчетов по обоснованию и выбору оптимального вида.

Эта задача актуальна как для условий реконструкции КС, когда решается задача о замене физически изношенных и морально устаревших агрегатов на ГПА нового поколения, так и для оптимального использования уже установленных газотурбинных и электроприводных агрегатов.

Одним из подходов к решению задачи является метод, основанный на использовании в качестве привода нагнетателя двигателя, имеющего минимальный расход топлива и денежных средств на выработку одного кВтч энергии на муфте нагнетателя.

При сравнении вариантов энергопривода нагнетателей на КС в расчеты целесообразно вводить лишь переменные величины.

При определении эксплуатационной себестоимости энергии наиболее характерными являются следующие слагаемые: расходы на топливо (электроэнергию), воду и смазочные материалы, энергетическое обслуживание основных агрегатов, ремонтно-техническое обслуживание, заработную плату производственного персонала.

Задача определения приведенных КПД на муфте нагнетателя при использовании газотурбинных агрегатов решается, исходя, прежде всего, из паспортных данных о КПД установок, их технического состояния и режимов работы ГПА на газопроводе.

Сложнее обстоит дело с определением приведенного КПД на муфте нагнетателя при использовании электропривода, в силу его зависимости от многих факторов вне КС и, прежде всего, от КПД тепловых электростанций, вырабатывающих эту электроэнергию.

По соотношению приведенных КПД газотурбинного и электродвигателя на муфте нагнетателя и соотношению цен на энергоносители в расчетах могут быть определены области рационального использования одного и другого вида привода.

С использованием цены на топливо и энергопривод несложно определить и сроки его окупаемости.

## **Повышение надежности функционирования газоперекачивающей компрессорной станции за счет применения регулируемых электроприводов механизмов технологического оборудования**

К настоящему моменту на компрессорных станциях (КС) ОАО «Газпром» на эксплуатируется более 700 электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) общей мощностью порядка 6 млн кВт, что составляет около 14 % от общей установленной мощности ГПА.

Более 70 % парка ЭГПА имеет срок службы свыше 15 лет, а отдельные агрегаты и компрессорные станции находятся в эксплуатации свыше 30 лет. В этом случае широкое поле деятельности по внедрению частотно-регулируемых ЭГПА открывается при реконструкции действующих объектов, на которых электропривод ГПА эксплуатируется свыше 15-20 лет.

Не вызывает сомнения, что применения регулируемых ЭГПА приведет к повышению надежности функционирования КС за счет увеличения срока службы и надежности электродвигателя и механических частей агрегата (редуктор, нагнетатель).

Немаловажным моментом в использовании регулируемых ЭГПА является так же обеспечение возможности регулирования производительности нагнетателей, что позволяет решить проблемы технологического характера на КС с меняющейся по времени нагрузкой, а также на КС с режимами работы, где имеется несоответствие рабочей точки нагнетателей параметрам работы газопровода.

Вторым объектом для применения регулируемых приводов на КС является аппарат воздушного охлаждения (АВО) газа и масла. Применение такого вида приводов ведет к увеличению надежности технологического оборудования и оптимизации процесса транспорта газа.

Третьим объектом является запорно-регулируемая арматура (ЗРА). Использование электрического привода повышает надежность срабатывания ЗРА, особенно это актуально в зимнее время.

В виду хорошей управляемости, применение электроприводных механизмов и организации АСУ ТП ведет к повышению надежности и оптимизации функционирования всей КС.

## **Влияние механических процессов в редукторе на надежность работы электроприводного газоперекачивающего агрегата**

Решение вопроса повышения надежности функционирования объектов транспорта газа является актуальной задачей. Для решения этой задачи, а так же во избежание возникновения аварийной ситуации на компрессорных станциях (КС), важно определять техническое состояние энергетического оборудования. Ключевым звеном любой КС является газоперекачивающий агрегат (ГПА), в котором широко применяется электропривод переменного тока с синхронным высоковольтным двигателем.

ЭГПА включает в себя: нагнетатель, электродвигатель, редуктор и трубопроводную обвязку. Общеизвестно, что эксплуатация трубопровода с повышенной вибрацией приводит к снижению прочностных характеристик металла, возникновению усталостных трещин и, как следствие, к их разрушению. Редуктор является промежуточным элементом во взаимодействии электродвигателя и трубопровода. Исследование процессов, протекающих в редукторе, проводящихся на математических моделях, позволяет лучше оценить состояние как двигателя, а соответственно и электрической сети, так и трубопровода.

При работе с переменной нагрузкой, что чаще всего и происходит на практике, есть вероятность, что частота собственных колебаний редуктора совпадет с частотой нагрузки, что в свою очередь приведет к возникновению резонансных явлений влекущих к раскачке выходу двигателя из синхронизма, т.е. к нарушению работы системы, а также разрушение редуктора. Велика нагрузка на редуктор в моменты пуска двигателей, что обуславливается большой мощностью и наличием люфта. При пуске в редукторе происходит механический удар.

Разрабатываются диагностические модели, позволяющие по измеряемым параметрам, переменным и набору статистических данных осуществлять прогнозирование технического состояния редуктора.

В среде программных продуктов SolidWorks создаются расчетные математические модели для исследования напряженно-деформированного состояния и визуальная трехмерная модель редуктора. Данный программный продукт позволяет исследовать процессы, происходящие в материале редуктора, для определения узких мест и пределов нагрузки, приводящих к разрушению.

УДК 621.313

Н.В. КИЯНОВ, ген. директор, О.В. КРЮКОВ, к.т.н., тех. директор  
(ООО «Интермодуль», г. Нижний Новгород)

## **Стабилизация параметров теплообмена в вентиляторных градирнях средствами автоматизированного электропривода**

Водооборотные системы широко используются для отведения низкопотенциального тепла от различных агрегатов в ведущих энергоемких отраслях промышленности. Охлаждение воды происходит в вентиляторных градирнях путем теплообмена с внешним воздухом (теплопередачей и испарением). Среди главных технологических требований, предъявляемых к процессу получения охлажденной воды, можно выделить: необходимость строгой стабилизации её температуры на выходе из градирни, инвариантное задание скорости вращения вентилятора в условиях воздействия случайных метеорологических и технологических возмущений, энерго-, ресурсосбережение, надежность и экологичность системы.

Реализацию данных требований целесообразно осуществить на основе использования локальных систем частотно-регулируемого электропривода насосов и вентилятора градирни, интегрированных в единую АСУ ТП водооборота предприятия. Фирмой «Интермодуль» разработаны и реализованы «под ключ» несколько подобных проектов на предприятиях металлургической, горнодобывающей, стекольной и нефтеперерабатывающей промышленности.

В результате статистической обработки экспериментальных данных работы градирен в различных климатических условиях и ТП получены регрессионные алгоритмы задания адекватной скорости вращения вентилятора. Они обеспечивают оптимизацию системы и инвариантность к различным стохастическим возмущениям, что подтверждает проведенный корреляционный, ковариационный и дисперсионный анализ, а также натурные испытания.

Синтез замкнутой САР частотно-регулируемого электропривода вентилятора градирни выполнен по главному технологическому параметру водооборота – температуре охлажденной воды на выходе и законом управления  $U/f^2 = \text{const}$ . Это позволило за счет плавного регулирования скорости обеспечить требуемую точность стабилизации параметров теплообмена в вентиляторных градирнях, а также высокую экономическую эффективность всей системы.

В единой интегрированной АСУ ТП водооборота представлены все необходимые задачи телемеханики и диспетчеризации работы системы с реализацией мониторинга, протоколирования и прогнозирования состояния оборудования на уровне систем, подсистем и отдельных элементов. По разработанным системам получено несколько патентоохраненных документов и большой объем результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

УДК 681.351:62-83.001

А.В. КОКИН, аспирант, А.Р. КОЛГАНОВ, д.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## Интервальный подход к определению границ устойчивости линеаризованных моделей

Обобщенный алгоритм конструирования моделей нелинейных непрерывных систем, сформулированный в [1], предполагает дискретное изменение параметров линеаризованных в рабочих точках векторно-матричных моделей при достижении определенными координатами порогового значения. Вместе с изменениями модели могут изменяться и настройки пропорционального регулятора состояния.

В исследовании рассматривается способ определения точек переклечения моделей на границе области устойчивости замкнутой линеаризованной системы в условиях неопределенности параметров. Предполагается, что представление системы в пространстве состояний зависит от стационарного вектора параметров  $\mathbf{p}$ :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{p})\mathbf{u}(t).$$

Неопределенность модели, обусловленную зависимостью вектора параметров  $\mathbf{p}$  от расположения рабочей точки в пространстве состояний, предлагается исследовать с помощью аппарата интервального анализа. В этом случае считается, что каждый параметр  $p_i$  может принимать значения из некоторого вещественного интервала  $[p_i]$ , а, следовательно, вектор параметров  $\mathbf{p}$  принадлежит векторному интервалу  $\mathbf{p} \in [\mathbf{p}]$ . Область устойчивости характеристического полинома

$$P(s, \mathbf{p}) = s^n + a_{n-1}(\mathbf{p})s^{n-1} + \dots + a_1(\mathbf{p})s + a_0(\mathbf{p})$$

есть множество всех значений векторов параметров  $\mathbf{p}$ , таких, что полином  $P(s, \mathbf{p})$  – устойчив.

На примере модели активной магнитной опоры показано, что определение границ области устойчивости линеаризованной замкнутой системы в заданной рабочей точке при фиксированном значении параметров регулятора можно выполнить в рамках задачи обращения множества и сделать это с помощью алгоритма SIVIA, описанного в [2].

### Литература

1. Колганов А.Р., Буренин С.В. Алгоритмы и программы функционального проектирования систем управления электромеханическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 1997. – 140 с.
2. Прикладной интервальный анализ / Жолен Л. и др. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 468 с.

## **Автоматизированная система оценки знаний учебных дисциплин специальности**

Подготовка бакалавров, инженеров и магистров предусматривает непрерывный мониторинг полученных знаний. Полное или частичное высвобождение преподавателей из этого процесса призвана обеспечить автоматизированная система оценки уровня знаний (СОУЗ).

СОУЗ разрабатывается как сетевая компьютерная система непрерывного мониторинга и управления качеством ресурсов специальности кафедры. Программное и информационное обеспечение соответствует современным Интернет-технологиям, международным стандартам на единое программное обеспечение и единый доступ пользователя.

В процессе оценки полученных знаний принимают участие четыре группы пользователей: *администратор*, в обязанности которого входят регистрация пользователей и настройка программных и информационных средств; *руководитель курса*, который является постановщиком задачи оценки знаний, имеет права редактирования контрольных заданий и весовых коэффициентов промежуточных результатов, формирует программу продолжения мониторинга знаний; *оператор сопровождения базы данных* осуществляет ввод и редактирование контрольных заданий, окончательных и промежуточных ответов, их весовых коэффициентов, все свои действия выполняет по заданиям руководителя курса; *студент* – допускается только для автоматизированного выполнения контрольных заданий.

Для автоматизированного формирования индивидуальной количественной оценки знания учебной дисциплины каждый студент самостоятельно в указанные сроки в компьютерном классе кафедры выполняет серию контрольных заданий.

Каждое контрольное задание состоит из нескольких задач, вопросов, тестов и т. п., имеющих одно однозначное численное решение. Положительное решение задания регистрируется с определенным заранее руководителем курса весовым коэффициентом только при абсолютном совпадении с заданным оператором ответом.

Система настроена на случайный выбор контрольного задания для каждого студента. Однако предусмотрена возможность предварительного жесткого закрепления индивидуальных заданий за отдельными студентами. Эта процедура должна выполняться по указанию руководителя курса.

По окончании выделенного срока руководитель курса получает обработанные результаты оценки полученных знаний, формирует и доводит до студентов программу продолжения образования.

Программные и информационные средства СОУЗ, обеспечивают возможность ее функционирования в режиме удаленного доступа.

УДК 621.313

К.К. КРУТИКОВ, к.т.н., доцент, В.В. РОЖКОВ, к.т.н., доцент,  
Ю.В. ПЕТРУХИН, аспирант  
(филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», г. Смоленск)

## Четырехуровневый автономный инвертор напряжения для частотного электропривода при различных алгоритмах управления

Схема четырехуровневого АИН [1] на модели в MATLAB рассматривалась при следующих законах управления его восемнадцатью ключами: симметричная аналоговая синусоидальная многоуровневая ШИМ [2]; симплексный алгоритм в двух вариантах. Аналоговая ШИМ [2] обладает фиксированным числом переключений на периоде несущей и не дает возможности активно влиять на спектральный состав выходного напряжения средствами управления. При синтезе симплексных алгоритмов [3], помимо основных целей слежения за задающим обобщенным вектором, ставились две дополнительные задачи: получение наименьшего числа переключений в пределах периода несущей и наилучшего спектра выходного напряжения. В первом варианте синтез обобщенного вектора с относительно малой амплитудой и свойством минимума переключений потребовал команды не только низшего уровня, но и более высокого, что ухудшает гармонический состав. Во втором варианте со свойствами наилучшего спектра выходных напряжений в этой ситуации использовались команды лишь низшего уровня, что ведет к увеличению числа переключений. Получение требуемого обобщенного вектора любой длины в симплексном алгоритме, хороший спектр выходного напряжения в сочетании с минимумом переключений может быть достигнуто, когда используются все уровни многоуровневого АИН. В рассматриваемой схеме АИН при его питании от источника с постоянным входным напряжением это условие выполняется только тогда, когда синтезируется относительно большой задающий вектор, и АИН управляется командами с высокими уровнями выходного напряжения. Если напряжение питания АИН сделать регулируемым тем или иным способом, то можно решить основную задачу управления в любых режимах его работы в сочетании с двумя дополнительными требованиями.

### Литература

1. Крутиков К.К., Петрухин Ю.В., Рожков В.В. Четырехуровневый автономный инвертор напряжения для глубокорегулируемого асинхронного частотного электропривода: Тр. XI Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». – МКЭЭЭ-2006, ч. 2. – С.37-38.
2. Tolbert L.M., Habetler T.G. Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Methods. //IEEE IAS 1998, October 10-15, 1998, p.p. 1424-1431.
3. Изосимов Д.Б., Байда С.В. Алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции трехфазного автономного инвертора напряжения // Электротехника. – 2004. – №4. – С.21-31.

## **Адаптивная система управления плотностью намотки гибкого материала**

Основной проблемой при построении систем управления плотностью осевой намотки гибких материалов является отсутствие возможности непосредственного измерения регулируемой координаты в процессе формирования рулона. Плотность намотки оценивается по результатам косвенных измерений, дающих большую погрешность, либо для оценки плотности используется некоторый эквивалентный показатель, характеризующий внутреннее состояние рулона. В этих условиях трудно говорить о качественном управлении намоткой, поскольку неопределенность измерения усугубляется еще и широким разбросом параметров формируемого в рулон материала (радиальный и тангенциальный модуль упругости, толщина и др.).

Известны методы управления осевой намоткой с использованием прогнозирующей модели рулона и эталонной модели рулона в контуре управления, описывающей желаемый характер формирования геометрии рулона на основе информации о физико-механических параметрах наматываемого материала. При этом формирование кривой намотки приближается к архимедовой спирали. Однако, такой способ управления, во-первых, более пригоден для систем с принудительным формированием геометрии рулона (периферическая намотка), а во-вторых, не обладает способностью подстройки под изменяющиеся параметры наматываемого материала.

Для построения гибкой системы управления плотностью осевой намотки предлагается использовать в структуре системы контуры самонастройки, осуществляющие управление параметрами регулятора через сигналы рассогласования базовой подсистемы и самонастраиваемой модели. Такая аналитическая самонастраиваемая система с минимизацией целевой функции по результатам косвенных измерений координаты управления и периодической обработкой алгоритма адаптации позволяет формировать сигнал управления намоточным натяжением в функции отклонения параметров от их базовых значений и перенастройки параметров (а в случае образования гофр – и структуры) базовой модели. В ходе работы системы управления одновременно осуществляются процессы измерения, коррекции и управления. Намотка первых витков происходит в режиме обучения, когда строится оптимальная модель базовой подсистемы. В дальнейшем система функционирует в режиме измерения и коррекции, обеспечивая формирование рулонной структуры с требуемыми плотностными показателями и предотвращая появление гофрообразования.

УДК 62-83:621.313.333

Б.С. КУРНЫШЕВ, д.т.н., профессор, Л.К. ИВАЕВА, студент  
(ИГЭУ)

## **Электромагнитная совместимость асинхронных электроприводов**

Широкое внедрение в промышленность регулируемых асинхронных электроприводов с преобразователями частоты неизбежно приводит, как показывает практика, к проблеме электромагнитной несовместимости, если не принимать специальных мер.

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС), согласно международным стандартам и Российским ГОСТ [1–3], в настоящее время понимают возможность электрооборудования действовать удовлетворительно в электромагнитной среде без производимых им электромагнитных помех таких уровней, которые были бы недопустимы для другого электрооборудования, находящегося в этой среде.

В решении такой задачи применение только экспериментального метода определения структуры и параметров фильтров ЭМС приводит к большим финансовым затратам. Поэтому в данном случае метод имитационного моделирования является хорошим дополнением к экспериментальному методу, и, следовательно, разработка математических и программных средств решения указанной задачи является актуальной не только в настоящее время, но и в обозримом будущем.

В работе применяются следующие методы: метод разбиения длинной линии с распределенными параметрами на участки конечной длины с сосредоточенными параметрами, метод узловых потенциалов, метод контурных токов, метод численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, метод имитационного эксперимента.

### **Литература**

1. **ГОСТ Р 51317.4.15-99 (МЭК 61000-4-15-97)** «Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний». Вводится впервые.
2. **ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95)** «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
3. **ГОСТ Р 51524-99** «Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.

УДК 62-83:621.313.333

П.А. ФОМИН, аспирант, Б.С. КУРНЫШЕВ, д.т.н., профессор  
(ИГЭУ)

## Фильтры электромагнитной совместимости для асинхронных электроприводов

В процессе работы асинхронного электропривода на выходе преобразователя возникают высокочастотные импульсы напряжения с амплитудой порядка 500 В. Эти импульсы напряжения распространяются вдоль двигательного кабеля, вызывая мощное электромагнитное излучение в окружающую среду. Если не принять специальных мер по ограничению излучения, то такой электропривод не будет удовлетворять современным требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС).

ЭМС – это способность технических средств удовлетворительно работать в реальной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых помех другим потребителям электрической энергии. Ввиду особой значимости проблемы ЭМС в России введен ряд новых стандартов, опирающихся на стандарты МЭК по ЭМС, принятые в Европе.

В данной работе предложено решение одной из задач электромагнитной совместимости применительно к системе «Преобразователь частоты – электрический кабель – асинхронный двигатель». Предлагаемое решение позволяет ограничить скорость нарастания напряжения на выходе преобразователя частоты на заданном уровне. Чтобы удовлетворить действующим стандартам, рекомендуемое значение скорости нарастания напряжения не должно превышать 500 В/мкс. В этом случае частота электромагнитного излучения не превышает 150 кГц, то есть спектр частот лежит за пределами радиодиапазона. Кроме того, ограничение скорости нарастания напряжения удовлетворительно сказывается на работе двигателя.

Известные решения указанной задачи используют электрические фильтры пассивного типа (содержащие катушки индуктивности, конденсаторы и резисторы). Отличие предложенного решения от известных заключается в том, что параметры фильтров определяют по следующим формулам в зависимости от длины кабеля:

$$L_{\Phi} = L_0 l_{\text{каб}}, \quad (1)$$

$$C_{\Phi} = 4C_0 l_{\text{каб}}, \quad (2)$$

$$R_{\Phi} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_{\Phi}}}, \quad (3)$$

где  $L_{\Phi}$  – индуктивность фильтра, Гн,  $L_0$  – приведенная индуктивность кабеля, Гн/м,  $C_{\Phi}$  – емкость конденсатора фильтра, Ф,  $C_0$  – приведенная емкость кабеля, Ф/м,  $l_{\text{каб}}$  – длина кабеля, м,  $R_{\Phi}$  – активное сопротивление фильтра, Ом.

## **Наблюдатели механической нагрузки регулируемого электропривода**

В большинстве случаев в основе построение систем управления регулируемым электроприводом лежит принцип регулирования «по отклонению», когда регулирование, например скорости, осуществляется с использованием отрицательной обратной связи. Или используют модальный регулятор на основе отрицательной обратной связи по состоянию. Такой подход обеспечивает достижение заданных динамических характеристик и необходимого статизма регулируемой переменной только при постоянстве механической нагрузки. Реакция электропривода на изменение нагрузки при регулировании «по отклонению» определяется порядком астатизма регулятора, который редко превышает единицу. В системах с модальным регулятором реакция на действие возмущения не контролируется.

В теории управления известен принцип построения комбинированных систем управления, в которых предполагается использование наряду с обратными связями по переменным обратных связей по действующим на объект регулирования возмущениям. Теоретически, при использовании этого принципа может быть достигнута инвариантность к возмущению. Использование этого принципа в регулируемом электроприводе сдерживалось сложностью реализации измерений переменной механической нагрузки электроприводов.

Наблюдатели состояния с астатизмом 1-го и 2-го порядков позволяют в электроприводах наряду с переменными получать оценку текущего значения механической нагрузки, которая может быть использована для реализации комбинированного управления и повышения, тем самым статических и динамических характеристик электропривода.

Проведенные исследования наблюдателей и теоретический анализ позволили выявить зависимость динамической ошибки восстановления нагрузки не только от характеристического уравнения наблюдателя, но и от нулей передаточной функции. Предлагается оригинальная методика построения и расчета параметров наблюдателей, обеспечивающая компенсацию влияния нулей на оценку механической нагрузки.

Во многих случаях в технологических процессах и промышленных установках динамические свойства механической нагрузки задаются частотными характеристиками. Предлагается новая структура и методика расчета параметров астатических наблюдателей состояния, обеспечивающая повышение качества определения механической нагрузки при ее изменении с заданными частотными свойствами.

Рассматриваются результаты исследований аналоговой и цифровой реализации вариантов построения наблюдателей нагрузки.

## **Автоматизация контроля за состоянием технологического оборудования отделочных поточных линий с использованием элементов электропривода**

Общим для отделочных поточных линий является то, что транспортировка ткани в процессе обработки осуществляется с помощью электропривода и при этом подвергается технологическим и механическим воздействиям. При этом управление транспортированием ткани может строиться по натяжению, вытяжке и другим параметрам.

В настоящее время помимо традиционных способов повышения конкурентоспособности продукции большое внимание уделяется надежности работы оборудования, снижению затрат на его эксплуатацию и ремонт.

С целью улучшения этих показателей предлагается автоматизированная система контроля за состоянием технологического оборудования. Известно, что момент сопротивления движению ткани во многих машинах поточной линии зависит от натяжения материала и сил трения, которые определяются состоянием технологического оборудования. Поэтому, если периодически в процессе работы производить тестирование загрузки двигателей, то можно определить состояние всех технологических машин линии. Анализ и обработка статистических данных позволят получить характеристики и выявить тенденцию (построить тренд) изменения состояния машин линии.

Подобный мониторинг позволит: значительно сократить выход из строя технологического оборудования; заранее прогнозировать состояние оборудования и благодаря этому планировать меры по техническому обслуживанию; решать задачи диагностирования оборудования, оценивать вероятность выхода оборудования из строя.

Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет компьютеризировать любой вид деятельности человека, связанной с обработкой информации. Диагностическую информацию о параметрах получаем из систем электропривода (токи, скорости, напряжения), а также для более развитой системы диагностирования от датчиков: натяжения, усилия прижима валов, вибрации оборудования, неравномерности вращения рабочих органов, температуры, уровня жидкости в различных аппаратах, влажности ткани. На первых этапах может быть использована упрощенная математическая модель технологического процесса, которая в процессе накопления статистических данных будет уточняться. Предлагаемая система позволит осуществлять централизованный контроль всего технологического оборудования отделочного производства.

## **Дискретное синергетическое управление синхронным двигателем с постоянными магнитами**

На сегодняшний день в развитии синхронного электропривода (ЭП) малой и средней мощности (до нескольких десятков киловатт) прослеживается тенденция к применению синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Такие двигатели, являясь бесконтактными, имеют большой воздушный зазор, что значительно повышает их надежность, высокие энергетические и массогабаритные показатели, высокую стабильность частоты вращения. Указанные достоинства открывают возможность построения на основе СДПМ высокоточных прецизионных ЭП с широким диапазоном регулирования скорости и момента.

Современное состояние теории синтеза оптимальных систем связано с развитием новых методов, опирающихся на физический подход и принципы синергетики. Наиболее перспективными для решения прикладных задач регулирования координат бесконтактных ЭП (в том числе и синхронных) на наш взгляд являются методы синергетического, «несилового» управления. Основным из этих методов стал метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов – АКАР. Он открывает возможность синтеза векторных законов управления, гарантирующих наличие в замкнутой системе свойств инвариантности и робастности. Техническая реализация таких систем вполне осуществима на базе современных микропроцессорных средств.

Использование микропроцессоров в контурах управления требует применения методов синтеза, которые учитывали бы особенности (дискретизация по времени, квантование по уровню, запаздывание по каналу управления и т. д.) дискретных и дискретно-непрерывных систем. В рамках синергетического подхода разработан метод синтеза дискретных регуляторов (метод АКАДР) [1], позволяющий получать высокоэффективные дискретные законы управления. На основе этого метода синтезирована нелинейная векторная система управления для ЭП с СДПМ, из результатов математического моделирования поведения которой можно заключить, что она обеспечивает высокую стабильность скорости вращения при малой чувствительности к изменениям параметров двигателя и нагрузки на валу.

### **Литература**

1. **Синергетика** и проблемы теории управления: сборник научных трудов / Под ред. А.А. Колесникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.

УДК 62-83:681

М.В. ФАЛЕЕВ, д.т.н., профессор, А.Н. ШИРЯЕВ, к.т.н., доцент  
А.А. ДЕЙНЕГА, студент  
(ИГЭУ)

## **Импульсно-фазовый электропривод дозатора газа**

В настоящее время перспективным направлением развития энергетики является использование газотурбинных технологий. В состав систем автоматического управления газотурбинных установок (ГТУ) входят дозаторы газа с электроприводом на базе шагового двигателя.

Применение в дозаторах газа электроприводов с шаговыми двигателями с точки зрения современной техники управления и силовой электроники является устаревшими. К недостаткам следует отнести большое потребление тока шаговым двигателем в режиме удержания, низкие точностные и регулировочные, особенно в динамических режимах, свойства, большие масса и габариты блока управления.

Для устранения этих недостатков и повышения технических характеристик дозаторов предлагается использовать импульсно-фазовый электропривод (ИФЭП) с двигателем серии ДБМ и синусно-косинусным вращающимся трансформатором (СКВТ) серии ВТ в качестве датчика обратной связи. Двигатель и датчик состоят из двух сборочных единиц (статора и ротора без вала) и без промежуточных соединений встраиваются непосредственно в механизм перемещения дозирующей иглы, благодаря чему повышается точность регулирования, упрощается кинематика и увеличивается надежность электропривода.

ДБМ, представляя собой синхронную электрическую машину с постоянными магнитами на роторе, используется в режиме вентильного двигателя, который реализуется с помощью СКВТ, совмещающего функции датчика положения ротора ДБМ, датчика скорости и датчика перемещения механизма. Управление приводом на основе контура фазовой синхронизации, оперирующего импульсными сигналами, которые в слабой степени подвержены влиянию внешних факторов, обеспечивает высокую стабильность характеристик ИФЭП. Применение микроконтроллера внутри контура фазовой синхронизации позволяет программными средствами реализовать функции устройств преобразования координат и формирования фазных напряжений двигателя.

Система управления ИФЭП реализуется на современной микропроцессорной технике – PIC-контроллере или конфигурируемой системе на кристалле. Использование в качестве силового преобразователя интеллектуального IGBT-модуля позволяет существенно сократить потери в силовом блоке и уменьшить его габаритные размеры.

Испытания ИФЭП с двухфазным двигателем ДБМ70, блоком регулирования на базе конфигурируемой системы Trisend TE505S16 и силового модуля Mitsubishi PS22052 подтвердили целесообразность его применения в дозаторах газа.

## **Моделирование электропривода с самотормозящим редуктором**

Использование червячных передач в кинематике электропривода обусловлено рядом их специфических особенностей и достоинств. Червячная передача относится к передачам зацепления с перекрещивающимися осями валов, угол перекрещивания которых обычно составляет 90 градусов. Основным достоинством червячной передачи является возможность получения в одной червячной паре большого передаточного отношения.

Ведущим в большинстве случаев является червяк. Поэтому для самотормозящего редуктора передача движения в направлении от колеса к червяку становится невозможной. Свойство самоторможения червячных передач используют в грузоподъемных и других механизмах.

В работе представлена модель электропривода постоянного тока, имеющего в своей кинематике самотормозящий червячный редуктор. Кроме известных звеньев, моделирующих двигатель постоянного тока, схема содержит ряд блоков, обеспечивающих моделирование эффекта самоторможения.

Вся совокупность этих блоков может быть подразделена на три группы:

- первая группа включает в себя блоки, которые отслеживают наличие и изменение величины возможного движущего момента со стороны червячного колеса; если момент, стремящийся повернуть червячное колесо, оказывается больше момента двигателя, то на выходе этой группы блоков формируется управляющий импульс соответствующей длительности;
- вторая группа содержит блоки, которые анализируют изменение напряжения управления двигателем постоянного тока;
- блоки третьей группы на основании информации по управляющим импульсам обоих каналов обеспечивают «сброс» интегратора в модели решения уравнения движения, моделируя эффект самоторможения.

Получены временные диаграммы, иллюстрирующие работу рассмотренного электропривода для различных режимов работы двигателя, а также для обоих направлений действия движущего момента со стороны червячного колеса. Для сравнения приведены аналогичные временные диаграммы рассмотренного электропривода с редуктором без самоторможения.

УДК 621.3.072.6

В.Л. ЧИСТОСЕРДОВ, к.т.н., доцент, Н.Е. ГНЕЗДОВ, инженер,  
С.В. ЖУРАВЛЕВ, инженер  
(ИГЭУ)

## **Средства коммуникации современных электроприводов переменного тока**

Комплексная автоматизация предприятия имеет целью построение единой информационно-управляющей автоматизированной системы управления предприятием (АСУП), решающей задачу достижения максимальной эффективности и прибыли. В технологическом процессе источником информации и объектом управления, как правило, является электропривод. Он выступает не только в качестве привода исполнительных механизмов, сервопривода, но и как активный компонент замкнутых контуров стабилизации, регулирования и оптимизации в автоматизированной системе управления технологическим процессом. Такая роль требует наличия в современном электроприводе развитых средств коммуникации, к которым отнесены аппаратные и программные опции, решающие задачи обмена информацией, управления и автоматизации в АСУП. При этом методики разработки средств коммуникации при проектировании систем электроприводов на настоящий момент не сложилось.

Проведен обзор технических решений в АСУП и последних серий преобразователей частоты (ПЧ) и комплектных электроприводов ведущих мировых производителей. На его основе определено место электропривода в структуре АСУП и задачи, стоящие перед ним, как элементом этой структуры. Выработаны требования к средствам коммуникации электропривода и критерии их выбора.

Предложена методика разработки средств коммуникации электропривода. Применение данной методики для системы многодвигательного электропривода, основанной на ПЧ и комплектных электроприводах российского производства, позволило получить в ПЧ и комплектных электроприводах серии ЭПВ набор средств коммуникации с функциональными возможностями не уступающими, а по ряду показателей превосходящими лучшие зарубежные аналоги [1].

Экспериментальные исследования, проведенные на испытательном стенде, подтвердили выполнение поставленных требований разработанными средствами коммуникации и их широкие функциональные возможности.

### **Литература**

1. **Многофункциональный** программно-аппаратный комплекс управления преобразователями частоты серии ЭПВ: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2005 г. / Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново: ИГЭУ, 2005.

## Моделирование динамики транспортной системы

В работе рассмотрены теоретические исследования поточной транспортной системы, состоящей из двух питателей с электромагнитными приводами. Теоретические решения транспортируемой сыпучей среды получены с учетом псевдооживления мелкозернистого материала. Перемещение слоя мелкозернистого материала по дну лотка вибрационного питателя, представлено в виде отрывного движения частиц с сопротивлением. Задачи исследования поточной транспортной системы, состоящей из вибрационных питателей, состояли в следующем:

- разработать модель, описывающую перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, электромагнитного привода и осуществить апробацию модели при сопоставлении с экспериментальными данными;
- теоретически исследовать перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, обосновать режимы работы, параметры электромагнитного привода с системой управления;

Математическая модель питателя представлялась в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши, которая описывала продольные и вертикальные колебания питателя с сыпучей средой. Описываемая механическая система имела двадцать степеней свободы. Причем учитывалась взаимосвязь между продольными и вертикальными колебаниями питателя и среды. Решение системы осуществлялось в MatLab Simulink. Результаты моделирования показали, что полное использование динамических свойств резонансных машин достигается с помощью систем автоматической подстройки частоты, осуществляющей поддержание резонансного состояния колебательной системы. Для возбуждения и стабилизации режимов работы резонансных машин применяют различные способы автоматического регулирования. Обеспечение оптимальных характеристик колебаний вибрационной машины осуществлялось путем синтеза элементов привода, конструкции питателя и системы управления, что требует создания соответствующих моделей.

## **Повышение эффективности подъема горного предприятия с асинхронным приводом**

В настоящее время актуально использование силовых схем, которые позволяют наиболее перспективно решать проблемы повышения энергетической эффективности и экономичности использования электрической энергии в полупроводниковых преобразователях.

Рассматриваемая система подъема оборудована асинхронным приводом с выпрямителем и АИН. Решение задач обеспечения необходимых энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей сводится, в первую очередь, к определению составляющих полной мощности энергетической подсистемы. При проектировании как питающих сетей, так и электротехнических комплексов и систем с полупроводниковыми преобразователями необходимо не только правильно учитывать и разделять все составляющие полной или кажущейся мощности, но и закладывать мероприятия по уменьшению мощностей обменного характера. Следует отметить, что эти мероприятия требуют трудоемкого расчета во временной и частотной областях. В данной работе задача решается с использованием пакета MATLAB/Simulink и его приложения SimPowerSystems.

В заключение можно отметить, что были решены следующие задачи: – определены составляющие полной (кажущейся) мощности и показатели качества потребляемой электроэнергии в трехфазных симметричных системах подъема; – реализовав различные алгоритмы управления полупроводниковым преобразователем, решены вопросы определения энергетически оптимального алгоритма управления подъемником; – на основании результатов, полученных в ходе моделирования, определены зависимости массогабаритных показателей энергетической подсистемы подъема.

Решение указанных проблем средствами самой преобразовательной техники возможно, так как в настоящее время за счет создания и освоения промышленностью высокоэффективных силовых приборов и вычислительных устройств на базе программируемых микроконтроллеров существенно расширились функции силовых устройств. Реализация новых алгоритмов управления потоком электроэнергии от источника к приемнику и наоборот позволяет активно влиять на показатели качества электроэнергии.

УДК 621.313

П.Д. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., зав. каф. ЭОП  
(ГОУ ВПО ВФ МЭИ (ТУ))  
Ю.А. ВЕТЛИЦЫН, инженер ЭТЛ  
(МУП «Водоканал»)

## Анализ функционирования системы электроприводов для регулирования режимов насосных станций

Для регулирования режимов работы насосных станций в городе Волжском установлены высоковольтные преобразователи частоты. В работе находится однодвигательный электропривод мощность 200 кВт и двух двигательный электропривод суммарная мощность 630 кВт.

Первый критерий эффективного применения частотно регулируемых приводов – диапазон регулирования частоты переменного тока. Определяется необходимым давлением в водопроводной сети, для насосных станций города Волжского составляет 30-50 Гц.

Второй критерий – статический или квазистатический режим работы электропривода. Для насосной станции с электроприводом 200 кВт условие статического режима выполняется очень хорошо (перевод с одной частоты на другую происходит до 4 раз в сутки ручным изменением задания). Для двух двигательного электропривода квазистатический режим удастся получить временной зоной нечувствительности к управляющим и возмущающим воздействиям. Полное время разгона исследуемого электропривода ~5 мин, при регулировании режима обрабатываются участки разгона (торможения), следовательно, интервал 5 мин достаточен для квазистатического режима.

В двух двигательном электроприводе регулирование двух электроприводов одновременно позволяет получить требуемое значение давления воды при значениях частоты тока меньших, чем у одного регулируемого из пары. Недостаток регулирования двух электроприводов одновременно – неравномерность распределения механического момента. Отличия механических систем, различия критических скольжений и магнитных систем электродвигателей приводят к разности нагрузок электроприводов на 5-20 %, что снижает их суммарные технологические возможности. Регулирование одного из пары электроприводов усложняет получение квазистатического режима, так как нерегулируемый агрегат вносит дополнительное возмущение.

Таким образом, применение одного варианта регулирования электроприводов насосной станции не может быть оптимальным во всех технологических режимах.

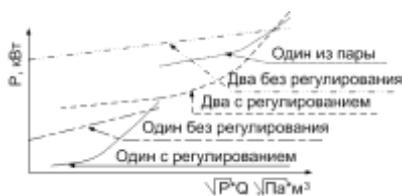


Рис. 1. Эффективность вариантов регулирования

### Литература

1. Васильев П.Д., Ветлицын Ю.А. Выбор вариантов системы регулирования электропривода насоса на примере насосной станции 3-го подъема города Волжского Волгоградской области: Тр. VI междунар. симпоз. 29.11-02.12.05. – Казань: Изд-во КГУ, 2006.

УДК 621.3.07

С.Г. ВОРОНИН, д.т.н., профессор, Д.В. КОРОБАТОВ, доцент  
(ЮУрГУ, г. Челябинск)

## Управление вентильным двигателем при несинусоидальной ЭДС

Существующие методики анализа электромеханических преобразователей (ЭМП) и синтеза управления вентильными двигателями (ВД) [1, 2] разработаны при допущении синусоидального распределения индукции в зазоре ЭМП, и, как следствие, синусоидальной ЭДС. С другой стороны, при конструировании ЭМП для ВД стремятся достичь трапецеидальной формы ЭДС. Поэтому существующие методики синтеза управления не дают удовлетворительных результатов, особенно, при высоких требованиях к точности регулирования крутящего момента ВД.

Получены уравнения, описывающие электромагнитные процессы, протекающие в ВД при любой форме ЭДС, не нарушающей симметрии фаз. Предлагается методика синтеза управления, позволяющая существенно повысить точность регулирования за счет учета реального распределения индукции в зазоре ЭМП как при дискретном переключении секций ВД, так и при векторном управлении в режиме широтно-импульсной модуляции базовых векторов (векторной ШИМ).

Согласно предлагаемой методике, для каждого конкретного ЭМП, экспериментально определяется в табличной форме зависимость фазной ЭДС от угла поворота и скорости вращения ротора. Полученная зависимость помещается в память управляющей микро-ЭВМ и используется в цикле расчета управления для получения мгновенного значения электромагнитного момента, которое, в свою очередь, передается в алгоритм регулирования тока. Таким образом, удается существенно снизить пульсации крутящего момента ВД даже при дискретной коммутации секций.

В режиме векторной ШИМ полученное значение электромагнитного момента используется для расчета необходимой скважности включения базовых векторов и амплитуды напряжения на секциях ВД.

### Литература

1. **Лифанов В.А.**, Воронин С.Г., Константинов В.Д. Расчет токов бесконтактных двигателей постоянного тока с разомкнутой трехсекционной обмоткой якоря: В сб. № 176 «Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей». – Челябинск: ЧПИ, 1976.
2. **[http://www.e-shikshalaya.com/vector\\_files/](http://www.e-shikshalaya.com/vector_files/)**

**АВТОРСКИЙ ИНДЕКС**

**А**

АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю. 53,55  
 АБРАМОВ С.В. 73  
 АВАНЕСОВ Э.Т. 79  
 АГАФОНОВА Н.А. 114  
 АДУШКИНА Е.С. 21  
 АЖИЩЕВ Р.А. 144  
 АЛЕКСЕЕВ Д.В. 165  
 АНАНЬЕВ С.С. 17  
 АНДРЕЕВ Д.А. 133,139,  
 150

АНДРУКЕВИЧ А.П. 57  
 АНДРЮШИН А.В. 199  
 АРТЕМЕНКОВ С.А. 143  
 АРХАНГЕЛЬСКАЯ Е.Л. 221  
 АРЦИШЕВСКИЙ Я.Л. 125  
 АСТАШОВ Н.С. 195  
 АХМЕТВАЛЕЕВА Л.В. 54  
 АЮПОВ Д.Ш. 7

**Б**

БАЖЕНОВ И.А. 141  
 БАЖЕНОВ О.А. 38  
 БАКУТА В.П. 134  
 БАЛАБАНОВИЧ В.К. 189  
 БАЛДОВ С.В. 49  
 БАЛЛОД Б.А. 91  
 БАРАБОШКИНА Т.В. 61  
 БАРОЧКИН Е.В. 182  
 БАТТИ М.К.Л. 210,214  
 БАШЕВ А.А. 109  
 БАЯНДИНА Е.В. 21  
 БЕЗРУКИХ С.В. 54  
 БЕЛОВ А.А. 80,81,82,  
 84

БЕЛЯЕВ Г.В. 31  
 БЕЛЯКОВ А.А. 205  
 БЛУВШТЕЙН Д.В. 100,104  
 БОБЫЛЁВ В.И. 29,30  
 БОГАТОВА Т.Ф. 179  
 БРАТОЛЮБОВ А.А. 48  
 БРЕЗГИНОВ Н.Н. 128,150,  
 151

БУРОВ В.Д. 158,159,  
 162  
 БУШУЕВ Е.Н. 212,213,  
 214,215

БУШУЕВА Н.В. 212  
 БУШУЕВА О.А. 43,62  
 БЫКОВ А.В. 19

**В**

ВАЛИУЛЛИНА Д.М. 142  
 ВАРНАШОВ В.В. 191,192  
 ВАСИЛЬЕВ А.В. 204  
 ВАСИЛЬЕВ П.Д. 254  
 ВАСИЛЬЕВ Ю.А. 54  
 ВЕРЕНИН А.А. 174

ВЕСЕЛОВА И.Е. 6  
 ВЕТЛИЦЫН Ю.А. 254  
 ВИДИН Ю.В. 176  
 ВИЛКОВ П.В. 231  
 ВИНОГРАДОВ А.Б. 226,227,  
 228,229,  
 230,235

ВИНОГРАДОВ В.Н. 182  
 ВИХАРЕВ А.В. 35,37  
 ВОРОБЬЕВ В.Ф. 31  
 ВОРОНИН С.Г. 255

**Г**

ГАДАЛОВ А.Б. 86  
 ГАЛИЕВ И.Ф. 53  
 ГАНДЖАЕВ Д.И. 45  
 ГАРИФУЛЛИН М.Ш. 142  
 ГАРЯЕВА Н.Г. 178  
 ГВОЗДЕВ А.В. 80,81  
 ГЕРАСИМОВ С.Е. 64,66  
 ГЕРАСИМОВИЧ Д.А. 138  
 ГЕРТ Е.А. 75  
 ГЛАЗУНОВ В.Ф. 232,233  
 ГЛОТОВ А.В. 250  
 ГНЕЗДОВ Н.Е. 234,251  
 ГОЛОШУМОВА В.Н. 171  
 ГОЛУБЕВ А.В. 116,117  
 ГОЛУБЕВ А.Н. 3,17,18,  
 19

ГОНЧАРОВА Л.К. 217  
 ГОРНУШКИН А.Р. 211  
 ГОРЯЧЕВ М.Н. 4,5  
 ГОРЯЧКИН С.Н. 39,40  
 ГОСТЬКОВ В.В. 209  
 ГРАНОВСКИЙ Н.А. 25  
 ГРАЧЁВ А.Н. 195  
 ГРЕЧИН В.П. 136  
 ГРЕЧУХИН В.Н. 48  
 ГУСЕВ В.А. 79

**Д**

ДАВЫДОВ В.В. 121  
 ДАУДИ С. 43  
 ДЕВОЧКИН М.А. 163,164  
 ДЕЙНЕГА А.А. 249  
 ДЕМИН С.Н. 204  
 ДЕНИСОВ А.Р. 93  
 ДЕНИСОВ Д.Г. 175  
 ДЕРИЙ В.П. 200,201  
 ДЕРЮГИНА Е.А. 138  
 ДЗЮЗЕР В.Я. 94  
 ДОРОХОВ Е.В. 167  
 ДУДОЛИН А.А. 158

**Е**

ЕВСИН С.И. 41  
 ЕЛИЗАРОВА Н.Н. 85  
 ЕЛОХИН С.О. 82

ЕРЕМИНА Н.А.	218	КИЯНОВ Н.В.	239
ЕРМАКОВ И.И.	15	КЛИМКОВИЧ П.И.	58
ЕРОФЕЕВ А.В.	146	КЛИМОВ С.С.	208
<b>Ж</b>		КОЗЛОВ В.К.	142
ЖУЙКОВ А.В.	176	КОЗЮЛИНА Е.В.	211
ЖУКОВ В.П.	182	КОКИН А.В.	240
ЖУРАВЛЕВ С.В.	235,251	КОКИН В.М.	105
<b>З</b>		КОКОУЛИН Д.Н.	23
ЗАБЕЛКИН Б.А.	53	КОЛГАНОВ А.Р.	240,241
ЗАГИБИН Ю.А.	87	КОЛОДИН И.Ю.	228,230
ЗАГРЕТДИНОВ И.Ш.	167	КОЛЯДА В.А.	196
ЗАЙЦЕВ А.А.	146	КОПЫРИН В.С.	134
ЗАЙЧИКОВ В.Н.	172	КОРНИЕНКО А.Н.	25
ЗАКИНЧАК Г.Н.	29	КОРОБАТОВ Д.В.	255
ЗАХАРЕНКОВ Е.А.	162	КОРОЛЕВА Е.В.	110
ЗАХАРОВ А.М.	236	КОРОМЫСЛОВ К.В.	195
ЗАХАРОВ М.А.	238	КОРОТКОВ А.А.	246
ЗАХАРОВ П.А.	236,237,	КОРОТКОВ А.В.	69
	238	КОРОТКОВ В.В.	69
ЗЕНИНА Е.Г.	111	КОРОТКОВ М.А.	157
ЗЕНОВА Е.В.	143	КОРЮКИН Л.Б.	3
ЗУБКОВ В.П.	101,102,	КОСЯКОВ С.В.	86,87
	103,104	КОТОВ С.С.	207
ЗЫБКИН М.С.	9	КОЧЕТКОВ А.Е.	225
<b>И</b>		КРАЙКОВ А.Н.	31
ИВАЕВА Л.К.	244	КРЕМЕНЕЦКАЯ М.Е.	124
ИВАНОВ А.А.	73	КРУТИКОВ К.К.	242
ИВАНОВ Д.В.	88	КРУТОВ А.О.	98
ИВАНОВА С.М.	170	КРУЦЕНЮК И.Ю.	95
ИВАНОВСКИЙ А.А.	169	КРЮКОВ О.В.	239
ИВАЩЕНКО А.В.	123	КУДРЯВЦЕВ Д.М.	148,149
ИЛЬИЧЕВ Н.Б.	50,52,152,	КУЛЕНКО М.С.	243
	155	КУЛЕШОВ А.И.	50,52,152,
ИЛЬИЧЕВА Е.Н.	155		155
ИЛЬЧЕНКО А.Г.	202,203,	КУЛИКОВ А.Л.	148,149
	204	КУЛИКОВ К.В.	8,11
ИСАЧЕНКОВ А.П.	224	КУЛТЫШЕВ А.Ю.	171
<b>К</b>		КУРНЫШЕВ Б.С.	244,245
КАДНИКОВ С.Н.	3,4,5,6	<b>Л</b>	
КАЗАКОВ А.Н.	129	ЛАГУНОВСКИЙ А.А.	206
КАЗЕННОВА Л.В.	85	ЛАПИН Е.С.	122,
КАЛАТУЗОВ В.А.	180	ЛАПШИН В.М.	129
КАЛАЧЕВА О.Н.	132	ЛАРИН А.Б.	212, 213,
КАЛМЫКОВ Ю.В.	122		215
КАНДАЛОВ Ю.В.	42	ЛАРИН Б.М.	211,213,
КАРАЧЕВЦЕВ Д.В.	166		214,215
КАРНИЦКИЙ Н.Б.	173,188	ЛАРИОНОВ С.В.	32
КАРПОВ М.А.	105,107	ЛЕБЕДЕВ В.Д.	9,16,48
КАСИЛОВ В.Ф.	158	ЛЕБЕДЕВ С.К.	246
КАТУЛИН А.В.	47	ЛЕГАЛОВА О.П.	194
КЕЛЛЕР Е.Е.	170	ЛЕГОСТАЕВА Н.В.	21
КИЕТ С.В.	211	ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	182,185,
КИРЕЕВ К.В.	10		187
КИРИЕНКО В.П.	59,60	ЛЕОНОВ А.В.	55
КИСЕЛЕВ А.В.	227,228	ЛЕТЯГИН А.В.	147,150
КИСЕЛЕВ В.В.	15	ЛИПАТОВ Т.В.	158,159
КИСЕЛЕВА Ю.А.	45,48	ЛИТВИНОВ А.П.	24

ЛИФШИЦ А.С.	70
ЛОГИНОВА Н.А.	13
ЛОШКАРЁВ А.Р.	196
ЛУКИНА В.Б.	216
ЛЯПУНОВ М.Ю.	147
ЛЯШОВ А.С.	168
<b>М</b>	
МАКАРЕВИЧ Е.В.	159
МАКАРЕНКО Н.А.	25
МАКАРОВ А.В.	23,130
МАКАРОВ А.Н.	197
МАКАРОВ Н.А.	23, 130
МАЛАФЕЕВА Т.В.	99,101
МАЛИКИНА М.В.	84
МАЛЫГИН А.Е.	216
МАЛЬЦЕВА О.Е.	97
МАНЧЕСТЕР Е.В.	22
МАРКОВ М.Г.	14
МАРТИРОСЯН А.А.	46
МАРТЫНОВ В.А.	7,16
МАРШАЛОВ Е.Д.	119,120
МАРЬЯНОВА С.И.	141
МАХАЕВА М.А.	216
МЕЛЬНИКОВ Ю.В.	157,160
МЕНАГАРИШВИЛИ А.В.	76
МИЛОСЕРДОВ Е.П.	97,98
МИРОНЕНКО А.В.	168
МИТЬКИН Ю.А.	27,30,32, 34,37
МИХЕЕВ П.Г.	177
МОНОВ Д.А.	230
МОРКОВКИН А.Ю.	89
МОХОНОВ А.А.	207
МОШКАРИН А.В.	157,160, 165,172, 195,196
МОШКАРИН А.В.	
МУРЗИН А.Ю.	62,70
МЫЛЬНИКОВ В.А.	154
МЯКИШЕВ В.М.	10
МЯСНИКОВ А.Н.	12
МЯСОУТОВА С.Б.	21
<b>Н</b>	
НАЗАРЫЧЕВ А.Н.	128, 130, 133,140, 141, 147,150
НАЗАРЫЧЕВ И.А.	
НАСОНОВ А.О.	71
НАУМОВ В.С.	12
НАУМОВ Ю.В.	114
НЕРЕЗЬКО А.В.	173
НЕЧАЕВА О.А.	119,120, 121
НИКИФОРОВ А.П.	16
НИКОЛАЕВА М.А.	77
НИКОНОРОВ А.Н.	118
НОВОЖИЛОВА Г.Р.	137

<b>О</b>	
ОВЕРЧЕНКО И.В.	191,193
ОСИПОВ И.В.	160
ОСЫКА А.С.	191
<b>П</b>	
ПАВЛОВ Д.С.	197
ПАНТЕЛЕЕВ Е.Р.	74,75,76, 135
ПАПКОВ Б.В.	133,140
ПЕДРО АНТОНИО	77
ПЕКУНОВ В.В.	253
ПЕТРЕНКО А.В.	148,149
ПЕТРУХИН А.А.	242
ПЕТРУХИН Ю.В.	192
ПИСАРЕВ М.А.	223
ПЛЕТНИКОВ С.Б.	90
ПЛЕХАНОВ Г.В.	198
ПЛОТНИКОВ П.Н.	199
ПОЛУШКИНА Е.Н.	77
ПОНОМАРЕВА К.А.	56
ПОНОМАРЕНКО Е.Г.	131
ПОПОВА О.В.	192
ПОРОШИН В.М.	185
ПОСПЕЛОВ А.А.	170,178
ПОТАПОВ В.Н.	169,171
ПОХОРИЛЕР В.Л.	96
ПРАХТ В.А.	247
ПРУДНОВ А.В.	33
ПРУСАКОВ М.В.	14
ПРЫГУНОВ С.Ф.	136
ПУТОВА Т.Е.	225
ПУШКОВ А.В.	
<b>Р</b>	
РАССКАЗЧИКОВ А.В.	131
РЕПИН А.А.	145,232, 248
РОЖКОВ В.В.	242
РУМЯНЦЕВА В.Е.	108
РУСАНОВСКИЙ А.А.	178
РЫЖКОВ А.Ф.	179
РЫКОВ А.П.	166,167
<b>С</b>	
САВИК А.В.	248
САЙКИН М.С.	20
САЙФУЛЬМУЛЮКОВ Ф.И.	18
САЛОВ Ю.В.	193
САПРУНОВА Н.М.	13
САРАПУЛОВ Ф.Н.	96
СЕДЛОВ А.С.	167
СЕМЕНОВ В.К.	200,201, 205
СЕМЁНОВ Д.В.	27
СЕРГЕЙ И.И.	57,58
СЕРОВ В.А.	50,52,152
СИБИРЦЕВ А.Н.	229,230
СИЛИН В.Е.	179
СИЛИЧ А.А.	196
СИЛУЯНОВ Б.П.	222

СИЛУЯНОВ Д.Б.	222,224	ФИЛИЧЕВ В.Т.	250
СКВОРЦОВ Д.Л.	118	ФОМИН П.А.	245
СКОВОРОДА Б.Ф.	112	ФОМИН Р.С.	196
СКОРОБОГАТОВ А.А.	145,146	<b>Х</b>	
СЛАВНЫЙ М.А.	160	ХАРИТОНИН И.Е.	202
СЛЫШАЛОВ В.К.	42,43,48	ХАРИШ И.Е.	126
СМИРНОВ И.А.	233	ХАРИШ Н.П.	126
СОГАНОВ М.И.	3	ХАРЬКОВСКИЙ В.Б.	41
СОКОЛОВ А.В.	194	ХРУНОВ В.А.	108
СОКОЛОВ А.Г.	156	ХУССАЙН ХАСАН АЛЬВАН	62
СОКОЛОВ А.М.	27,28,29, 30	<b>Ц</b>	
СОКОЛОВ А.Ю.	197	ЦЕЛИЩЕВ М.Ф.	198
СОКОЛОВ Д.В.	34,35,36	ЦЮНЬ ГЭ	125
СОКОЛОВ М.И.	44	<b>Ч</b>	
СОКОВА М.А.	158,159	ЧАСТУХИНА Т.В.	31
СОЛОВЬЕВ М.Л.	102,103	ЧЕРНОВ В.А.	143
СОЛОДОВ С.В.	72	ЧЕРНЫШЕВ В.А.	143
СОЛОМАНИЧЕВ М.А.	233	ЧИЖ В.А.	173
СОНИН Д.О.	91	ЧИСТОВ Ю.А.	37
СОРОКИН А.Ф.	61	ЧИСТОСЕРДОВ В.Л.	230,251
СТЕПАНОВ В.Ф.	200,201,	ЧУКРЕЕВА И.А.	145
СТЕПАНОВ Д.В.	208	ЧУХИН И.М.	161
СТРЕБКОВА Н.А.	217	<b>Ш</b>	
СУВОРОВ В.А.	74	ШАМОНТЬЕВ И.Е.	195
СУЛЫНЕНКОВ И.Н.	128,150, 153	ШЕЛЫГИН Б.Л.	172,195, 196
<b>Т</b>		ШЕРСТОБИТОВ И.В.	168
ТАДЖИБАЕВ А.И.	64	ШИЛОВ С.В.	38,39
ТАЛАМАНОВ С.А.	114,115	ШИРЯЕВ А.Н.	249
ТАЛАНОВ В.Д.	220,221,	ШКОДА А.Н.	188
ТАЛАНОВ С.В.	220,223	ШКОДА В.Н.	189
ТВЕРСКОЙ Ю.С.	113	ШНЫРОВ Е.Ю.	199
ТЕТЕРЕВКОВ И.В.	219	ШОШИН В.Г.	204,208
ТИТОВ В.Г.	12	ШУВАЛОВ С.И.	174,177
ТИХОВ М.Е.	38	ШУИН В.А.	69,70,71, 72,
ТИХОМИРОВ И.А.	8	ШУЛЬПИН А.А.	47,49
ТОКОВ А.Ю.	207	ШУРТУХИН А.А.	203
ТОМИНА И.В.	78	<b>Щ</b>	
ТОРОПОВ А.М.	225	ЩЕБНЕВ В.С.	200,201
<b>Ф</b>		<b>Ю</b>	
ФАЛЕЕВ М.В.	249	ЮРЧЕНКО А.В.	253
ФЕДОСОВ С.В.	108	ЮРЧЕНКО О.А.	252
ФЕДОТОВ А.И.	55	<b>Я</b>	
ФИЛИППОВ Г.А.	39	ЯСИНСКИЙ Ф.Н.	77

## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ .....	4
СЕКЦИЯ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ.....	76
СЕКЦИЯ 3. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	113
СЕКЦИЯ 4. НАДЕЖНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТАНЦИЙ И ЭНЕРГОСИСТЕМ.....	128
СЕКЦИЯ 5. ТЕПЛОВЫЕ И АТОМЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ.....	157
СЕКЦИЯ 6. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И УСТАНОВКАМИ.....	226

### ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**  
(XIV Бенардосовские чтения)

*Печатаются в авторской редакции*

I том

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать 17.04.2007. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 18,78. Тираж 300 экз. Заказ .

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто»  
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39