

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

## **МАТЕРИАЛЫ**

Международной научно-технической конференции

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

(XIII Бенардосовские чтения)

***18-20 октября***

***К 125-летию открытия сварки Н.Н. Бенардосом***

**Иваново 2006**

В материалах научно-технической конференции отражены результаты научных исследований в области теории и практики энергетики и электротехнологии.

Редакционная коллегия:

акад. МАИ, д-р техн. наук, проф. **В.Н. НУЖДИН** (председатель),  
д-р техн. наук, проф. **В.П. ЖУКОВ** (зам. председателя),  
д-р техн. наук, проф. **Ю.А. МИТЬКИН**,  
д-р техн. наук, проф. **В.А. МАРТЫНОВ**,  
д-р техн. наук, проф. **В.Е. МИЗОНОВ**,  
заведующая РИО **С.В. КЛЮНИНА**

*Отпечатано с оригиналов, представленных авторами – участниками конференции.*

ISBN 5-89482-418-4  
ный

© □ ГОУ ВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2006.



## СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 621.328: 666.015.45

В.И. БОБЫЛЁВ,  
(АО «Домостроительная компания»)  
Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., проф., А.М. СОКОЛОВ, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ)

### **Исследование параметров электротепловой обработки бетона токами промышленной и ультразвуковой частоты**

Электроразогрев бетона токами сквозной проводимости рассматривается в настоящее время, как наиболее перспективный в будущем способ тепловой обработки железобетонных изделий в процессе их изготовления [1]. Этот способ обладает высокими технико-экономическими показателями и может постепенно вытеснить из употребления традиционные методы тепловой обработки (паром, продуктами сгорания газа), в том числе на предприятиях крупнопанельного домостроения [2]. Для осуществления такой электротепловой обработки удобно использовать источники переменного напряжения повышенной частоты, выполненные на основе полупроводниковых преобразователей частоты [3]. Однако в настоящее время практически отсутствуют сведения о параметрах электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты, что явилось причиной проведения экспериментальных исследований, результаты которых представлены в настоящей работе.

В ходе экспериментов производилась обработка бетонных образцов токами высокой (20 кГц) и промышленной частоты с использованием специально разработанного и изготовленного для этого лабораторного стенда. Питание стенда осуществляется от сети 220 В, при этом напряжение сначала подается на регулировочный трансформатор, на выходе которого стоит комплект измерительных приборов К 505, содержащий амперметр, вольтметр и ваттметр. Если испытания проводятся на промышленной частоте, то с выхода прибора К 505 напряжение прикладывается непосредственно к объекту. Если испытания проводятся на повышенной частоте, то с выхода прибора К 505 напряжение подается на транзисторный преобразователь частоты. Преобразователь собран по мостовой схеме с использованием четырех транзисторов типа КТ-840А, управление транзисторами осуществляется от задающего генератора. На выходе полупроводникового преобразователя получается регулируемое переменное напряжение повышенной частоты (20 кГц). Это напряжение подается на трансформатор, выполненный на ферритовом сердечнике. На выходе трансформатора подключен осциллограф для определения величины и формы выходного напряжения, а также амперметр для опре-

деления величины тока, протекающего через объект. Выходное напряжение высокой частоты прикладывается к объекту испытаний.

В качестве объекта испытаний использовались образцы бетонной смеси в виде куба с ребром 10 см. Для получения таких образцов применялись формы, изготовленные из прозрачного изоляционного материала (оргстекла). Электроды изготавливались из алюминиевой фольги и прижимались к противоположным поверхностям образца через эластичные и теплоизоляционные прокладки. Для измерения температуры образца между электродом из фольги и поверхностью образца устанавливалась электрически изолированная от фольги термопара. При проведении испытаний на образец подавалось напряжение и с помощью регулируемого трансформатора поддерживалась постоянная мощность (50±200 Вт), в результате чего он нагревался до 80°C и выдерживался при этой температуре 30 минут и более. После обработки образцы находились в лаборатории и остывали естественным образом. В ходе экспериментов фиксировалась мощность, передаваемая на объект, величина тока и напряжения на образце, определялись электрическое сопротивление образца и коэффициент полезного действия (КПД) полупроводникового источника питания. Кроме образцов, подвергавшихся электротепловой обработке, была изготовлена контрольная партия образцов, которые выдерживались при комнатной температуре. Все образцы подвергались механическим испытаниям с целью определения прочности на сжатие через 1÷28 суток после электротепловой обработки (или изготовления).

В результате выполненных исследований получено, что изменение электрического сопротивления образцов во времени в процессе электротепловой обработки качественно имеет одинаковый характер при обработке напряжением как промышленной, так и повышенной частоты. Эти зависимости имеют вид кривой с минимумом, который соответствует моменту достижения максимальной температуры (80°C). Такой характер зависимостей объясняется тем, что вначале из-за разогрева бетона происходит снижение его сопротивления, затем с течением времени происходит отверждение бетона и переход воды в связанное состояние, в результате чего уменьшается число свободных зарядов, и сопротивление образцов возрастает. Это является подтверждением электролитической природы проводимости бетона при преобладающем участии в ней ионов диссоциированных молекул воды и веществ, растворенных в воде. Можно высказать предположение также, что величина электрического сопротивления бетона может использоваться для косвенной оценки его механической прочности или других неэлектрических показателей. Сопоставление зависимостей для частот 50 Гц и 20 кГц, позволяет сделать вывод, что сопротивление образцов при напряжении 20 кГц на 10-20% ниже, чем при напряжении 50 Гц, причём, с течением времени это различие нарастает. Это объясняется заметной проводимостью при напряжении высокой частоты, что приводит к таким положительным последствиям, как более однородное выделение тепла в объёме материала и отсут-

стве искрения в местах плохого контакта между электродом и поверхностью бетона.

Измерения механической прочности образцов показали, что электротепловая обработка позволяет повысить их прочность в первые 5-6 дней после изготовления. В дальнейшем механическая прочность обработанных и необработанных образцов практически не отличается. Механическая прочность образцов обработанных напряжением 20 кГц в среднем несколько выше, прочности образцов, обработанных напряжением 50 Гц, но для окончательных выводов требуется больший объём экспериментальных сведений. Таким образом, не подтверждаются опасения, что электротепловая обработка бетона токами ультразвуковой частоты может снизить его механическую прочность. Увеличение длительности изотермической стадии электротепловой обработки, как ожидалось, приводит к достаточно быстрому увеличению механической прочности бетона. Например, суточная прочность образцов увеличилась в 2÷2,3 раза при увеличении длительности этой стадии от 0,5 часа до 2 часов.

По результатам экспериментов не удалось выявить заметного влияния каких-либо факторов (сопротивление образцов, длительность обработки, передаваемая мощность и др.) на величину КПД источника питания ультразвуковой частоты и усреднённое значение этого показателя составило 0,91. Этот результат является весьма обнадеживающим с точки зрения технико-экономической целесообразности применения таких источников питания. Они, хотя несколько уступают по величине КПД трансформаторным источникам 50 Гц (их КПД 0,97÷0,98), могут иметь почти на порядок меньшую стоимость. Современные мощные высоковольтные транзисторные специализированные сборки позволяют создавать преобразовательные источники питания неограниченной предельной мощности для электротепловой обработки любых железобетонных изделий.

### Литература

- 1. Энергосберегающие** технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / Трембицкий С.М. / Бетон и железобетон. – 2004. – №6.
- 2. Технологические** схемы и процессы электроразогрева бетона на предприятии крупнопанельного домостроения / В.И. Бобылёв и др. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Х Бенардосовские чтения). – Иваново, 2001. – С. 16.
- 3. Разработка** высоковольтного оборудования и технологии электротепловой обработки изделий токами ультразвуковой частоты / О.А. Баженов, Ю.А. Митькин и др. // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 07-09.02.2006. – Санкт-Петербург, Россия. – Т. 5. – С. 317-318.

УДК 621.384.617

В.Ф. ВОРОБЬЕВ, к.т.н., доц., Г.В. БЕЛЯЕВ, асп., А.Н. КРАЙКОВ, асп.  
(ИГЭУ)

## **Численное моделирование процессов ионизации в плазме экспериментального ускорителя**

При проектировании ускорителей заряженных частиц, используемых в технологии имплантации, ставится задача получить необходимую концентрацию легирующих примесей в обрабатываемом материале. Концентрация примесей напрямую зависит от количества заряженных частиц, внедряемых в приповерхностные слои материала, при условии, что энергия этих частиц достаточна для их внедрения в подложку. В связи с этим очень важно проследить за процессом ионизации, изучая пространственное распределение зарядов, а также их энергию. Экспериментальное исследование этих параметров затруднено, поскольку сопряжено с высокими затратами на создание оборудования и проведение эксперимента. Поэтому экономически более эффективным является численное моделирование физических процессов в газе с использованием ЭВМ.

Поскольку в задаче расчёта энергии направленного движения ионов несут существенны случайные колебания частиц в плазме, то в численной модели достаточно ограничиться рассмотрением плазмы на расстояниях не меньше радиуса Дебая. В таком приближении эффективным является применение метода макрочастиц. В численной модели этого метода вся совокупность взаимодействующих компонентов в разрядном промежутке разделяется на ансамбли с одинаковыми свойствами. Для плоскопараллельного поля такие ансамбли представляются в виде перемежающихся вдоль разрядного промежутка плоскостей с частицами – «облаками». В начальный момент времени все «облака» случайным образом распределяются вдоль разрядного промежутка. Плотность частиц на «облаке», его скорость и направление движения выбираются из условия сохранения принятого закона распределения составляющих газовой смеси по скоростям. Вблизи катода располагаются «облака» электронов, исполняющих роль начальных электронов. Под действием внешнего электрического поля «облака» электронов ускорятся и вступают во взаимодействие с «облаками» нейтральной компоненты.

Для расчёта процессов формирования разряда в газах была разработана программа PLASMA. В программе методом макрочастиц моделируются процессы ударной ионизации и неупругие взаимодействия электронов с ионами и нейтральными частицами. Принято, что при взаимодействии «облака» электронов с анодом происходит его полная компенсация («облако» уничтожается). При расчёте взаимодействия «облака» положительно заряженных ионов с катодом учитываются процессы частичного рассеяния их энергии, изменения направления движения после удара на противоположное, нейтрализации заряда и выбивания вторичных электронов.

Программа разбита на две части. В первой производится заполнение начальных условий: состав газа, его температура и давление, расстояние между электродами, а также количество облаков. Эти данные

сохраняются в файле на жёстком диске. Во второй части программы производится собственно расчёт плазмы методом макрочастиц. Эта программа загружает из сохранённого файла данные, введённые в первой части, и производит расчёт. Блок-схема расчёта приведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема программы расчёта



Во время работы программы число облаков увеличивается, и их учёт занимает всю машинную память, сильно замедляя работу. Чтобы избежать этого, во время вычислений отслеживается случай, когда вычисления требуют всю оперативную память машины, и в этот момент производится «уплотнение облаков». Суть этой операции заключается в том, что «облака» с близкими параметрами (энергией) объединяются в одно «облако», которое имеет энергию, равную среднему арифметическому энергии частиц обоих первоначальных «облаков», и количество частиц, равное сумме числа частиц обоих «облаков».

Для оценки достоверности получаемых результатов была проведена проверка программы на стандартной задаче. Результаты расчетов в целом достаточно достоверно отражают общую картину процесса. Во-первых, анализ ионизационных процессов показал, что ионизирующая способность электронов в начальной лавине в большой степени зависит от расположения и величины положительного объемного заряда ионов. Во-вторых, для условий, соответствующих нормальному режиму существования тлеющего разряда, показано, что в развивающейся первой лавине не все электроны испытывают соударения с нейтральными частицами и, вследствие этого, испытывают столкновение с анодом, имея достаточно большую энергию. В результате этого возможно незначительное рентгеновское излучение плазмой тлеющего разряда (эффект «канальных лучей»). В-третьих, как и описывается во многих научных работах, рост столба квазинейтральной плазмы начинается вблизи анода. Данная модель хорошо демонстрирует этот процесс. Он начинается с того, что рост положительного объемного заряда вблизи анода снижает напряженность электрического поля у его поверхности и электроны,двигающиеся в головке лавины, быстро теряют скорость. Эти медленные электроны, при дальнейшем их накоплении в районе анода, частично компенсируют падение напряженности электрического поля вблизи анода, и ионизационный процесс снова возобновляется. Процесс повторяется циклически, причём в этой части промежутка возрастает степень ионизации, но интегральная величина – напряженность электрического поля – остается достаточно низкой.

Общий характер процесса подтверждает работоспособность предложенной математической модели и реализованного в программе PLAS-MA алгоритма.

## **О влиянии климатических факторов на характеристики частичных разрядов в стеклопластиках**

Изучение процессов старения полимерной изоляции под действием различных климатических факторов представляет большой интерес [1, 2].

Существенное влияние на процессы старения полимерных материалов оказывают частичные разряды (ЧР) [3].

Поэтому большой практический интерес представляет изучение характеристик ЧР для полимеров, а также влияние различных внешних условий на характеристики ЧР.

В данной работе представлены результаты исследования влияния температуры и влажности окружающей среды на характеристики ЧР в полимерных материалах. Методика измерения ЧР соответствовала ГОСТ-Ту 20074-74 [4].

Графики полученных зависимостей приведены на рис. 1 и 2. Анализ полученных результатов показывает, что предварительный нагрев приводит к снижению электрической прочности материалов. Причем для СТЭФ-1 длительность выдержки при повышенной температуре не влияет на величину пробивного напряжения, тогда как у стеклопластика снижается по мере увеличения длительности нагрева.

Как видно из кривых (рис. 1, 2), выдержка образцов при температуре  $+75^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению формы характеристик  $q_{\text{ЧР}} = f(U)$  и  $I_{\text{ЧР}} = f(U)$ , они сглаживаются и становятся практически линейными.

Причем если интенсивность ЧР в образцах стеклотекстолита при неизменном напряжении мало зависит от длительности выдержки при повышенной температуре, то в образцах стеклопластика, наблюдается резкое увеличение интенсивности ЧР при увеличении длительности пребывания образцов в термостате. Возникновение интенсивных ЧР как для стеклотекстолита, так и для стеклопластика после нагрева происходит при более низком напряжении, чем на исходных образцах. Для стеклопластика снижение напряжения начала ЧР более существенно, чем для стеклотекстолита. Предпробивная интенсивность ЧР для данного материала после различных времен выдержки в термостате близка по значениям, а для стеклопластика она мало отличается от исходной.

При испытании на воздействие повышенной влажности образцы выдерживались в течение определенного времени в гигростате при относительной влажности воздуха  $\varphi=95 \div 98\%$  и при температуре  $t=20 \div 25 \text{C}$ .

Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4. Интенсивность ЧР после увлажнения на 2-3 порядка превосходит исходные значения характеристик ЧР на всем диапазоне изменения напряжения вплоть до пробоя.

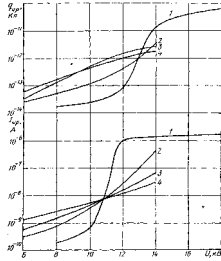


Рис. 1. Зависимость единичного кажущегося заряда  $q_{чр}$  и тока частичных разрядов  $I_{чр}$  от приложенного напряжения для образцов СТЭФ-1 при 75°С после выдержки: / -  $t=0$ ; 2 - 24 ч; 3 - 240 ч; 4 - 408 ч

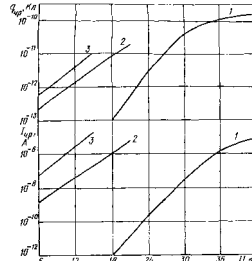


Рис. 2. Зависимость единичного кажущегося заряда  $q_{чр}$  и тока частичных разрядов  $I_{чр}$  от приложенного напряжения для образцов стеклопластика на основе смолы ПН-1 при 75°С после выдержки: / -  $t=0$ ; 2 - 120 ч; 3 - 408 ч

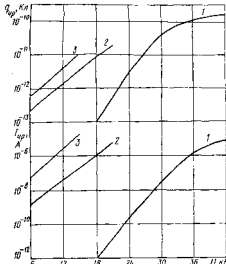


Рис. 3. Зависимость единичного кажущегося заряда  $q_{чр}$  и тока частичных разрядов  $I_{чр}$  от приложенного напряжения для образцов СТЭФ-1 при  $\phi=98\%$  после выдержки / -  $t=0$ ; 2 - 120 ч; 3 - 408 ч

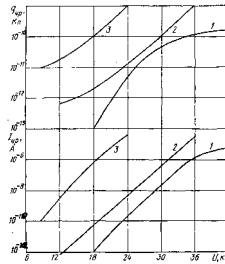


Рис. 4. Зависимость единичного кажущегося заряда  $q_{чр}$  и тока частичных разрядов  $I_{чр}$  от приложенного напряжения для образцов стеклопластика на основе смолы ПН-1 при  $\phi=98\%$  после выдержки / -  $t=0$ ; 2 - 120 ч; 3 - 408 ч

Однако предпробивные значения характеристик ЧР для исходных образцов и образцов, подвергшихся испытаниям, близки по значениям. Возрастание интенсивности ЧР после увлажнения может быть объяснено проникновением избыточного количества влаги внутрь стекловолокну, что

способствует перераспределению напряженности поля по толще диэлектрика и может приводить к локальному увеличению напряженности и к возникновению ЧР при более низком общем напряжении, приложенном к образцу.

### ВЫВОДЫ

1. Напряжение пробоя для обоих исследованных материалов снижается после воздействия температуры или влажности. Для стеклопластика  $U_{пр}$  уменьшается с увеличением времени выдержки образцов при тех или иных условиях испытаний. Для стекло- текстолита время выдержки при  $t=+75^{\circ}\text{C}$  не оказывает влияния на величину  $U_{пр}$  с увеличением времени выдержки в атмосфере с повышенной влажностью напряжение пробоя снижается. Уменьшение  $U_{пр}$  при воздействии повышенной влажности воздуха для обоих материалов более существенно, чем снижение, обусловленное воздействием повышенной температуры.

2. Интенсивность ЧР для стеклопластика при определенном напряжении растет при увеличении времени воздействия на образцы повышенной температуры или влажности окружающей среды. Однако предпробивные значения интенсивности ЧР мало отличаются друг от друга и близки к исходным. Для СТЭФ интенсивность ЧР увеличивается в зависимости от времени воздействия повышенной влажности воздуха. Воздействие температуры существенного влияния на интенсивность ЧР не оказывает.

3. Во всех случаях как для стеклопластика, так и для стеклотекстолита характеристики ЧР после испытаний приобретают более сглаженный характер и могут достаточно точно аппроксимироваться прямыми линиями.

### Литература

1. Койков С.Н., Цикин А.М. Электрическое старение твердых диэлектриков. – М-Л.: Энергия, 1968.
2. Влияние климатических факторов на физико-механические и диэлектрические свойства стеклопластиков на основе многослойных стеклотканей / Л.В. Яманова, Л.В. Новожилова и др. / В сб.: Диэлектрические материалы радиоэлектроники. – М.: МИРЭА, 1977.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.
4. ГОСТ 20074–74. Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характеристик частичных разрядов.

## **Шунтирующие выключатели с жидкометаллическим контактом для оптимизации режимов работы технологических установок**

Современные тенденции в развитии энергоемких производств химической и металлургической промышленности, выражающиеся в постоянном росте единичных мощностей электролизных установок, увеличении токовых нагрузок и возрастании отключаемых токов, привели к необходимости наряду с модернизацией существующих коммутационных аппаратов интенсифицировать исследования по разработке электрических контактов и аппаратов новых типов, предназначенных для коммутации силовых электрических цепей постоянного тока.

Для создания аппаратов, коммутирующих цепи постоянного тока до 100 кА мощностью до 50 МВт, в ряде случаев перспективным представляется применение жидкометаллического контакта. Среди основных достоинств жидкометаллических контактов можно выделить: малое переходное сопротивление за счет увеличения эффективной площади контактирования, высокая механическая и электрическая износостойкость, малое контактное нажатие, отсутствие свариваемости контактов, незначительное влияние формы поверхности электрода на контактное сопротивление и т.д.

К наиболее распространенным в жидкометаллических контактах металлам относятся ртуть, легкоплавкие щелочные металлы, галлий и его эвтектики. Область применения ртути и щелочных металлов ограничена необходимостью принятия дополнительных мер безопасности при эксплуатации. Галлий и его сплавы выгодно отличаются тем, что нетоксичны, не воспламеняются на воздухе и находятся в жидком состоянии в широком диапазоне температур. Наиболее распространение получила эвтектика галлий-индий-олово с температурой плавления  $10,6^{\circ}\text{C}$  и температурой кипения выше  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Вместе с тем, опытная эксплуатация силовых коммутационных аппаратов с жидкометаллическим контактом выявила ряд проблем, от решения которых зависит дальнейшее развитие и расширение области использования аппаратов подобного типа. В первую очередь это касается повышения их номинальных параметров и ресурса работы.

Решения этой задачи можно добиться путем поиска новых нетрадиционных способов построения контактно-дугогасительной системы, эффективно использующих специфические свойства жидкометаллического токопровода.

Проведенный анализ показал, что при конструировании силовых коммутационных аппаратов с жидкометаллическим контактом на

указанные параметры должны быть комплексно решены следующие основные задачи:

1. Управление жидким металлом, обеспечивающее магнитогиродинамическую и термическую устойчивость жидкометаллического токопровода.
2. Обеспечение необходимого уровня межконтактной изоляции в отключенном положении аппарата.
3. Создание устойчивых главных контактов.
4. Эффективное гашение электрической дуги.
5. Защита жидкого металла от окисления.

Для решения первых двух задач целесообразно создание конструкций, в которых объем жидкого металла минимален, а зона контактирования удалена от изоляционных поверхностей на достаточное расстояние.

Под устойчивостью главных контактов понимается обеспечение их эрозионной стойкости и стабильного низкого переходного сопротивления. В аппаратах для коммутации токов большой величины проблема снижения влияния электродуговой эрозии является весьма острой.

Целесообразность дугогашения на жидком металле обусловлена значительно меньшим влиянием электродуговой эрозии на переходное сопротивление контактов и работоспособность аппарата по сравнению с твердометаллическим вариантом. Однако в этом случае необходимость поддержания неизменной геометрии контактных поверхностей заменяется контролем за качественным составом жидкого металла.

Это обстоятельство открывает принципиальную возможность создания аппаратов, ресурс которых в основном определяется ресурсом жидкого металла, на который в первую очередь влияет уменьшение его объема за счет разбрызгивания и испарения, а также изменение его физико-химических свойств из-за воздействия электрической дуги.

В этой связи особое значение приобретает определение оптимального количества жидкого металла, так как требование его минимизации для обеспечения устойчивого жидкометаллического токопровода ограничивается объемом, необходимым для того, чтобы за время дугогашения дуга горела только на жидком металле.

Таким образом, можно сформулировать необходимые требования и возможные мероприятия, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик коммутационных аппаратов с жидким металлом:

- удаление изоляционных поверхностей рабочей камеры от зоны контактирования;
- порциальная доставка жидкого металла в зону контактирования;
- минимизация объема жидкого металла, используемого для контактирования;
- функциональное разделение контактной системы на главные и дугогасительные контакты;
- создание максимально возможного ограничения тока на этапе перед возникновением электрической дуги и ее гашением.

К одному из эффективных способов использования специфических свойств жидкометаллического контакта относится возможность осуществления программируемой коммутации, т.е. существенного контролируемого изменения параметров (электрических, геометрических и т.д.) контактной системы аппарата по заданному закону с целью создания условий, благоприятных для гашения электрической дуги отключения. Такое программирование коммутации может осуществляться до момента полного отключения цепи или зажигания электрической дуги.

Уже на этапе размыкания главных контактов или удаления жидкого металла из контактного зазора могут быть сформированы необходимые начальные условия для последующего дугогашения. За счет текучести жидкого металла возможно создание токоограничения благодаря увеличению сопротивления контактной системы в результате изменения формы жидкометаллического токопровода в процессе отключения.

Осуществление программируемой коммутации позволит уменьшить перенапряжения, снизить эрозию контактов, а также по-новому подойти к вопросам дугогашения, существенно облегчить дугогасительную систему аппарата, а в ряде случаев и полностью ее исключить.

Так как конструкции аппаратов с жидкометаллическим контактом обладают большим многообразием технических решений, то реализация программируемой коммутации в них также может осуществляться на различных принципах:

- изменение параметров цепи в процессе коммутации;
- струйное отключение;
- изменение топологии отключаемой цепи в процессе коммутации.

На основе проведенных исследований и опытно-промышленной эксплуатации сильноточных коммутационных аппаратов на ряде предприятий России, разработан сильноточный коммутационный аппарат модели КСКА-50 с жидкометаллическим контактом, содержащий ряд новых технических решений, позволяющих увеличить сопротивление изоляции аппарата, значительно снизить скорость окисления рабочего тела, обеспечить эрозионную стойкость главных контактов.

Клиновой сильноточный коммутационный аппарат модели КСКА-50 является шунтирующим выключателем постоянного тока с контактной системой, работающей в среде жидкого металла (эвтектика галлий-индий-олово) без водяного охлаждения. Номинальный ток – 50 кА, номинальное напряжение постоянного тока – 120 В. Коммутационная износостойкость: при 120 В – не менее 100 циклов «В-О», при 24 В – не менее 1000 циклов «В-О».

Аппарат позволяет осуществлять дистанционный полуавтоматический режим управления технологическим процессом электролиза и выводить в ремонт любой электролизер без прекращения работы всей серии. Это повышает производительность процесса электролиза, ведет к снижению потерь электроэнергии, обеспечивает сокращение численности обслуживающего персонала, улучшает условия труда и культуру производства.

УДК 621.314.21: 621.3.048

О.А. БАЖЕНОВ, к.т.н., доц., А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., ст. преп.,  
Д.В. СОКОЛОВ, асп.  
(ИГЭУ)

## **Оценка параметров уплотнительных узлов маслонаполненного оборудования**

Большое влияние на состояние внутренней изоляции маслаполненного оборудования оказывают уплотнительные узлы, к которым относятся уплотнения бака, вводов напряжения и смотровых люков. Они обуславливают скорости увлажнения твердой и жидкой изоляции, а также вытекания трансформаторного масла через уплотнения. Технический уровень состояния уплотнительных узлов маслаполненного оборудования в условиях его эксплуатации определяется нормами на герметизацию и маслостойкость. Однако по мере увеличения времени эксплуатации оборудования отмечаются случаи (до 20-25 % от общего числа повреждений) вытекания трансформаторного масла через уплотнения, что также приводит к дополнительному ухудшению электроизоляционных характеристик внутренней изоляции. Оценить степень герметизации и маслостойкости уплотнения техническими средствами сложно, поэтому важно разработать его физическую и математическую модели и соответствующий алгоритм расчета. Особенно эта задача актуальна для малообъемного оборудования, например, трансформаторов тока и напряжения, у которых отсутствуют системы удаления влаги.

Натекание воздуха в бак трансформатора через границу раздела фланец-резина происходит по зазорам, образующимся в зоне контакта фланцев и уплотнительной резины, а также сквозь толщу резинового уплотнения (рис. 1). Профиль этих зазоров и их количество зависят от неровностей поверхностей фланца и резины. В связи с этим для описания течения сред по зазорам целесообразно выбрать модель зоны контактообразования в виде пористого слоя, через который фильтруется среда. Бак маслаполненного оборудования считается герметичным, если в течение заданного времени натекания прирост изменения давления воздуха в баке от начального до конечного значения не превысит нормативной для данного типа оборудования величины.

На основе описанной выше физической модели была разработана прикладная компьютерная программа расчета уплотнительных узлов маслаполненного высоковольтного оборудования. Алгоритм программы состоит из трех блоков. В блоке расчета уплотнений по условию герметичности задается условие его прекращения при достижении равенства значения постоянной времени натекания воздуха в бак ее нормативному значению. Последовательность расчета допустимой степени сжатия уплотнительной прокладки по условию герметичности бака трансформатора сводится к следующему. Для исходных условий по (1) определяется шаг изменения степени сжатия уплотнения.



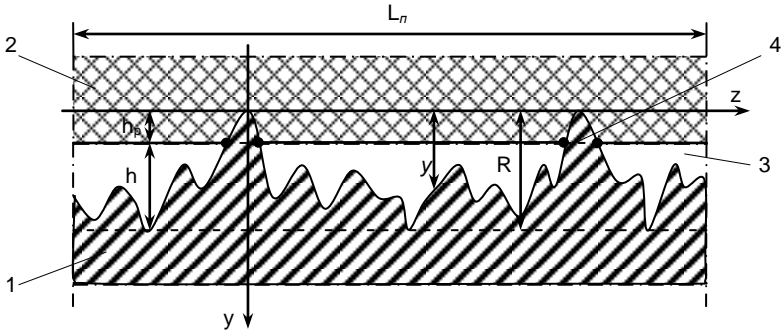


Рис. 1. Модель контактирования металлического фланца и резиновой прокладки в начальной стадии их сближения:  
 1 – металлический фланец; 2 – резиновая прокладка; 3 – пространство, занятое порами; 4 – отрезок опорной длины

$$\varepsilon_{0,0} = \varepsilon_{0,m} = \frac{0,17\kappa_{\Pi}\sqrt{\kappa_{\Pi}} \cdot \operatorname{tg}\alpha}{1 - \mu_p} \quad (1)$$

Задаются, начиная с  $m = 1$ , шаги расчета, по (2) определяется деформация уплотнения, а по (3) – высота микрокапилляра.

$$\varepsilon = \varepsilon_m = 1 - (1 - \varepsilon_{0,0})^m \quad (2)$$

$$\frac{h_{\kappa,\varepsilon}}{R_z} = \frac{h_{\kappa,m}}{R_z} = (1 - \kappa_{\Pi})^{\frac{[\ln(1-\varepsilon)]}{\ln(1-\varepsilon_{0,0})}} \quad (3)$$

Далее расчет ведется при последовательном увеличении номера шага расчета до выполнения условия (4).

$$\frac{b_p V \mu_B \cdot \ln \frac{P_0 - P_H}{P_0 - P_H - \Delta P_H}}{RT \dot{t}_H \cdot (Ab_p + \kappa_0 \rho_B L_{\Pi} a)} = 1 \quad (4)$$

Относительная деформация, соответствующая данному условию, и будет в данном случае допустимой степенью сжатия уплотнительной резины по условию герметичности бака трансформатора.

Во втором блоке программы выполняется расчет маслостойкости уплотнительных узлов на основе разработанных выше математических моделей процессов вытекания трансформаторного масла через уплотнение бака трансформатора. При этом определяется по выражению (5) предельная высота капилляра, при которой отсутствует течение масла через пористый слой на границе раздела фланец-резина.

$$h_{к,п} = \frac{4 \left[ 0,035 - 8,57 \cdot 10^{-5} (T - 20) \right]}{h_M \rho g + p_{\Gamma}} \quad (5)$$

С использованием разработанной программы были произведены расчеты изменения необходимой степени деформации уплотнений в зависимости от различных физико-механических параметров уплотнительных узлов (рис. 2, и 3). Расчеты произведены для уплотнения разъема бака силового трансформатора ТДЦ-4000000/500, высота масляного столба над которым составляет 4 м.

Анализ влияния высоты масла над местом установки уплотнения показал, что при увеличении высоты слоя масла необходима степень сжатия значительно возрастает, поэтому уплотнения, установленные в

нижней части бака, должны деформироваться более сильно, чем установленные в верхней части. Кроме того, в ходе расчетов было установлено, что при высоте слоя масла менее одного метра необходимая степень сжатия определяется условием обеспечения герметичности.

Из рис. 3 видно, что качество обработки поверхности фланца оказывает значительное влияние на необходимую степень сжатия уплотнения. Это позволяет рекомендовать выполнение более тщательной обработки поверхности фланца для уменьшения степени деформации уплотнений и облегчения режима их работы.

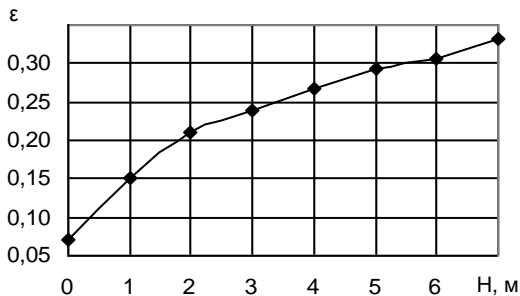


Рис. 2. Зависимость необходимой степени деформации уплотнения от высоты слоя масла над местом его установки (по условию маслоплотности)

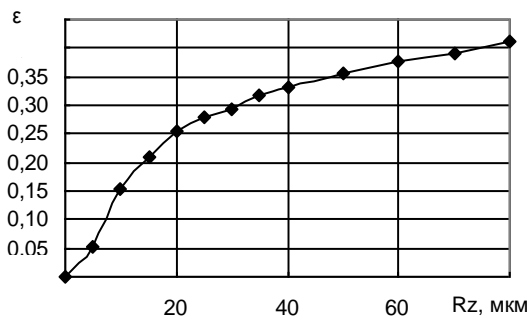


Рис. 3. Зависимость необходимой степени деформации уплотнения от максимальной высоты выступов на поверхности фланца (по условию герметичности)

УДК 621.314.21: 621.3.048

Ю.А. МИТЬКИН, д.т.н., проф., А.В. ВИХАРЕВ, к.т.н., ст. преп.  
(ИГЭУ)

## **Прогнозирование изменения параметров высоковольтного оборудования с дифференцированным учетом результатов эксплуатационного мониторинга**

Срок службы высоковольтного маслонаполненного оборудования с определяется, в основном, состоянием твердой изоляции и, как показывает опыт эксплуатации, составляет десятки лет. Для обоснованного продления срока службы такого оборудования необходимо создание эффективных методов оценки его технического состояния.

Одним из методов, позволяющих решить эту задачу, является метод постепенного накопления повреждения. При этом характеристикой, указывающей на уровень технического состояния оборудования, является его мера повреждения, изменяющаяся от своего начального значения до критического, при котором происходит окончательное повреждение системы. Мера повреждения характеризует условия нагружения и характеристики оборудования, позволяя прогнозировать показатель ресурса при сложных условиях по данным эксплуатационных измерений. На основе анализа физических процессов в оборудовании, для меры повреждения устанавливается полуэмпирическая зависимость от параметров, измеряемых в эксплуатации и влияющих на ее изменение. С использованием результатов эксплуатационного мониторинга изоляции для этой зависимости определяются постоянные коэффициенты. Полученное выражение используется для прогнозирования изменения меры повреждения оборудования.

Во время эксплуатации на высоковольтное оборудование влияет множество факторов (температура, перенапряжения, увлажнение и многие другие). Под действием этих факторов в жидкой и твердой изоляции происходят различные химические процессы, в результате чего изоляция изменяет свои физико-химические свойства. Техническое состояние изоляции на прогнозируемом участке времени в большей степени определяется значениями контролируемых параметров изоляции для моментов времени, близко расположенных к времени прогнозирования (к текущему моменту времени). Поэтому целесообразно результаты испытаний использовать с определенным весовым коэффициентом, учитывающим их значимость. Значение коэффициентов увеличивается по мере приближения времени наблюдения к участку прогнозирования.

Для определения расчетного тренда изменения меры повреждения все данные эксплуатационных испытаний следует разделить на две области: обучающую область и проверочную область. Определение расчетного тренда (постоянных коэффициентов) производится с использованием данных испытаний только обучающей области. Проверочная область используется для оценки ошибки прогнозирования применительно к данному оборудованию. На этой области данных производится расчет тренда, опреде-

ленного на обучающей области, и определяется отклонение расчетного тренда от данных испытаний. Погрешность, с которой расчетный тренд описывает эксплуатационные данные на проверочной области, принимается равной погрешности предстоящего прогнозирования.

При эксплуатации силового высоковольтного оборудования производится ограниченное количество испытаний изоляции. В связи с этим обучение следует проводить с использованием всей выборки результатов испытаний. К проверочной области следует отнести данные последних эксплуатационных испытаний, так как они наиболее близки к прогнозируемому участку. Для получения тренда, наиболее близко описывающего экспериментальную зависимость обучающую выборку следует разбить на две области:  $T_{об1}$  и  $T_{об2}$  (рис. 1б). Значение весового коэффициента на участке, непосредственно прилегающем к области прогнозирования ( $T_{об2}$ ), принимается равным единице. Анализ данных эксплуатационного мониторинга показал, что целесообразно длительность этой области принять равной 3–5 лет. Это позволяет полностью учесть влияние как минимум двух последних эксплуатационных испытаний.

Для описания зависимости весового коэффициента от времени на  $T_{об1}$  можно принять следующее выражение:

$$g_i = \left[ \frac{a + \frac{t_i}{T_{об1}}}{a + 1} \right]^r, \quad r \geq 1, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $r$  – постоянные коэффициенты.

При этом критерий выбора наиболее точного прогнозирующего тренда выглядит так:

$$\sum g_i \cdot \left( x_i^*(t) - x_i(t) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $x_i^*(t)$  – данные эксплуатационных испытаний,  $x_i(t)$  – значение прогнозирующего тренда,  $g_i$  – весовой коэффициент.

В связи с тем, что в критерий выбора расчетного тренда входит весовой коэффициент, влияющий на числовое значение критерия при различных  $a$  и  $r$ , необходимо ввести дополнительное условия выбора расчетного тренда. В качестве дополнительного условия вводится минимум погрешности на проверочной области.

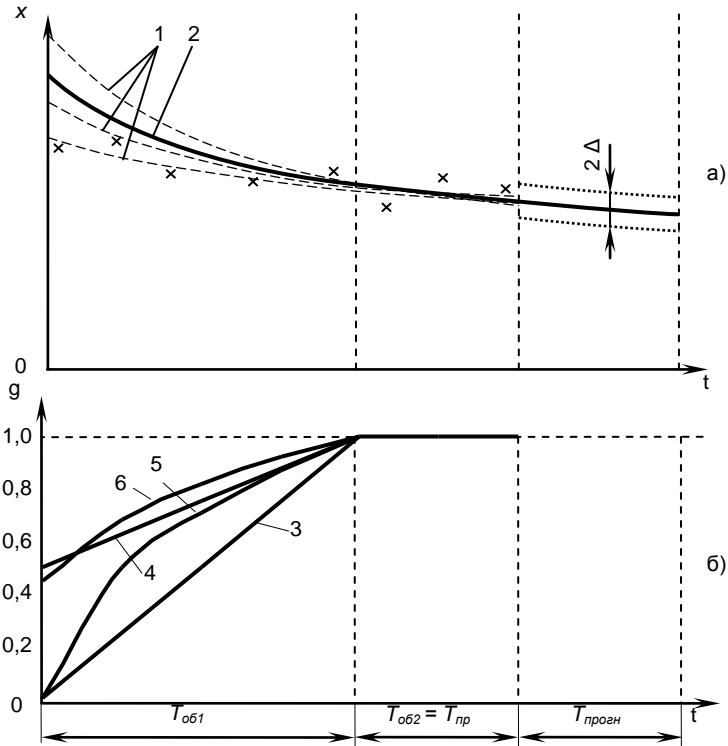


Рис. 1. Изменение расчетного тренда от времени при различных весовых коэффициентах:

$x$  – мера повреждения;  $x$  – экспериментальные значения;

$T_{об1}$  – первая обучающая область (весовой коэффициент изменяется);

$T_{об2}$  – вторая обучающая область (весовой коэффициент равен единице);

$T_{пр}$  – проверочная область;  $T_{прогн}$  – проверочная область;

1 – тренды, при различных коэффициентах; 2 – оптимальный тренд;

3 - 6 – весовой коэффициент при различных параметрах.

Результаты исследований показали (рис. 1,а), что использование весового коэффициента при прогнозировании изменения параметров изоляции силовых трансформаторов приводит к повышению точности прогноза. В дальнейшем следует изучить влияние длительности проверочной области и функции изменения весового коэффициента на точность прогнозирования.

## **Процессы формирования осадка из частиц примесей на поверхности фарфоровой покрышки высоковольтного ввода**

Процесс формирования осадка имеет несколько последовательных стадий. В течение них на коллоидные частицы в определенных областях масляного канала действуют силы различной природы. В данном процессе можно выделить две области с различными явлениями в них: внешнюю и внутреннюю.

Во внешней области в результате температурного перепада и изменения плотности масла по высоте канала ввода существует интенсивное движение масла (конвекция) в виде восходящего и нисходящего потоков. Эти гидродинамические потоки трансформаторного масла оказывают значительное влияние на движение коллоидных частиц. Так как скорость потоков масла больше скорости седиментации частиц, то частицы двигаются в соответствии с потоками масла. Следовательно, движение частицы в этой области будет определяться конвективным движением среды. По этой причине концентрацию коллоидных частиц во внешней области можно считать постоянной.

Одновременно на коллоидные заряженные частицы в объеме масла действует неоднородное переменное электрическое поле. Воздействие внешнего поля приводит заряженные частицы в аperiодическое движение [1].

Вблизи остова ввода заряженная частица колеблется в переменном неоднородном электрическом поле и одновременно выталкивается к внешнему электроду с некоторой скоростью. При колебаниях она может приближаться к поверхности остова, но не останется на ней, т.к. скорость диполофореза будет её увлекать во внешнюю область. Кроме того, процесс «захвата» (оседания) частиц твердой поверхностью занимает определенное время, которое будет больше, чем время, необходимое для удаления частицы на расстояние  $\Delta x$  от остова под действием диполофореза.

Вблизи поверхности с меньшей напряженностью поля частица колеблется и одновременно приближается к поверхности в течение всего времени наблюдения. В результате со временем она попадает в вязкий слой, и там начинают действовать силы зеркального изображения и окончательно фиксируют её в пристеночной области.

Таким образом, заряженные частицы в основном будут оседать на поверхностях, находящихся в областях с меньшей напряженностью переменного электрического поля.

На основании анализа гидродинамического потока жидкости (конвективное движение) и движения заряженной частицы в неоднородном электрическом поле во вводе показано, что:

- заряженные частицы удаляются от поверхности остова ввода по направлению к крышке. Это наблюдается во всём объёме масляного канала, так как максимальная напряженность электрического поля находится вблизи центрального стержня;

- не представляется возможным заранее предсказать результирующую траекторию движения с учётом электрического воздействия и гидродинамического (конвективного) потока, так как в потоке жидкости происходит обмен слоёв жидкости;

- можно считать, что сила электрического поля оказывает заметное влияние на движение частицы к крышке в основном в области, прилегающей к крышке.

В результате в первом приближении можно считать, что частицы поставляются гидродинамическим потоком на границу пристеночного слоя, и с этого момента на частицу начинает действовать электрическое поле.

Во внутренней области (пристеночный слой) скорость потоков масла небольшая (снижается при приближении к твёрдой поверхности крышки) и значительное влияние на движение коллоидных частиц начинают оказывать силы тяжести и электрического поля. Из-за увеличения влияния электрического поля процесс коагуляции частиц начинает ускоряться. На эти процессы оказывает влияние диффузия частиц. Эту же область можно разбить на две зоны: вдали от стенки и вблизи стенки.

Во внутренней области вдали от стенки под действием силы внешнего переменного неоднородного электрического поля главную роль начинает играть аperiodическое колебательное движение коллоидных частиц в область с наименьшей напряженностью электрического поля (поверхность фарфора). В ней формируется общий поток частиц, состоящий из потока частиц, обусловленного воздействием внешнего электрического поля; потока частиц, обусловленного диффузионными процессами; потока частиц, обусловленного радиальной составляющей внешнего гидродинамического движения масла в канале.

Во внутренней области вблизи стенки дополнительно возникают электрические силы зеркального отображения, которые притягивают частицы к стенке канала (фарфоровой крышке). В большей степени начинают проявляться процессы коагуляции частиц. Происходит формирование цепочечных структур из одиночных частиц. Цепочки из частиц притягиваются к поверхности фарфора и далее служат центрами для формирования более длинных цепочек.

Силовые линии электрического поля направлены под углом к твердой поверхности и имеют нормальную и тангенсальную составляющие. Процесс формирования цепочек частиц можно разбить на два этапа.

В течение первого этапа в результате оседания частицы постепенно заполняют свободные места на поверхности фарфора. При приближении заряженной частицы к твердой поверхности на расстояние, равное её размерам, на неё начинает действовать сила зеркального изображения.

Эта сила прижимает и удерживает частицу у поверхности фарфора. Концентрация частиц на поверхности будет со временем увеличиваться. Расстояние между ними будет уменьшаться.

Однако первый этап может продолжаться до определенного момента времени. По мере увеличения числа частиц на единице поверхности с некоторого момента времени  $t_{\text{крит}}$  поляризованные частицы на поверхности под действием собственного электрического поля начинают «захватывать» (притягивать) частицы поступающие из внешнего пространства. Будем считать, что в течение этого времени ( $t \leq t_{\text{крит}}$ ) образуется одинарный слой из равномерно расположенных частиц.

$$t_{\text{крит}} = \frac{1}{\Phi(aR)^2}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – поток частиц,  $a$  – некоторый постоянный коэффициент,  $R$  – радиус частиц.

Второй этап соответствует промежутку времени  $t > t_{\text{крит}}$ . На данном этапе коллоидные частицы будут присоединяться (захватываться) к частицам, уже расположенным на поверхности фарфора. После соблюдения условия  $t = t_{\text{крит}}$  начинается процесс построения цепочек.

При  $t > t_{\text{крит}}$  частицы, идущие из внешнего пространства, будем считать распределяются равномерно по всем «зародышам цепочек». При этом места образования цепочек на поверхности будут случайно расположенными. Однако общая направленность (область их расположения) будет ограничена и определяется конфигурацией (направлением) силовых линий электрического поля вблизи поверхности фарфора.

Время соединения цепочек из частиц друг с другом определится так:

$$t_{\text{мост}} = \left( \frac{a}{2} + 1 \right) \cdot \frac{1}{(aR)^2 \Phi} \quad (2)$$

С момента времени  $t \geq t_{\text{мост}}$  начинает развиваться процесс формирования сквозного разряда по поверхности. При этом можно полагать, что цепочки, расположенные на поверхности, инициируют возникновение локальных частичных разрядов (ЧР). Образовавшиеся при ЧР углеродные частицы способствуют зарождению более устойчивых цепочек. ЧР возникают в различных местах с некоторой вероятностью. Однако с некоторого момента времени эти процессы начинают развиваться в определенном направлении, которое определяется неоднородностью внешнего электрического поля вблизи поверхности фарфоровой крышки. Завершающей стадией являются процессы формирования разрядного канала по поверхности фарфора по науглероженным дорожкам, которые заканчиваются сквозным разрядом по поверхности.

### Литература

1. Духин С.С., Малкин Э.С., Духин А.С. Аперiodический инерционный дрейф дисперсных частиц в неоднородном переменном поле // Коллоидный журнал, том XL, вып. 4, 1978.



## **К расчету разрядных напряжений изоляционных промежутков КРУЭ на основе статистических методов**

В начале 80-х годов прошлого века произошел качественный скачок в технологии высоковольтных коммутационных аппаратов: на смену масляным и воздушным пришли аппараты с использованием в качестве изоляционной и дугогасительной среды вакуума и газообразной шестифтористой серы – элегаза.

Ведущие зарубежные фирмы практически полностью перешли на выпуск комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) и элегазовых выключателей для открытых распределительных устройств (ОРУ) на классы напряжения 110 кВ и выше [1].

Выбор оптимальных геометрических размеров и рабочего давления элегаза для технической изоляции не может проводиться только по измерениям на лабораторных образцах, так как для этих целей пришлось бы затратить неоправданно большие средства. Необходимы методики предварительного расчета такой изоляции.

Большое разнообразие условий эксперимента по определению разрядной напряженности  $E_p$  и эксплуатации элегазового высоковольтного оборудования затрудняет создание единого метода для расчета пробивных напряжений на основе общих аналитических зависимостей.

В настоящее время наряду с другими получила распространение методика, позволяющая при строгом учете экспериментальных данных для разрядной напряженности и статистических характеристик газового разряда рассчитывать выдерживаемые напряжения промежутков сложной геометрии с достаточной для практики точностью [2]. Изоляционный промежуток в этом случае рассматривается как многоэлементная несвязанная система, статистика пробоя которой целиком и однозначно задается статистическими характеристиками её элементарных промежутков. Для проведения расчетов необходимо выбрать вид функции распределения (ФР) вероятности разрядных напряжений в единичных промежутках, составляющих многоэлектродную систему, являющуюся моделью технической изоляции.

Известно, что статистические характеристики пробивных напряжений находятся в хорошем качественном и количественном согласии с несколькими математическими законами распределения непрерывных случайных величин. По практическим соображениям рекомендуется использовать либо нормальное распределение, либо двойное экспоненциальное распределение в зависимости от условий работы изоляции.

В данной работе сопоставляются результаты расчета статистических характеристик разрядного напряжения изоляционного промежутка КРУЭ 110 кВ, полученные с использованием двух ФР разрядных напря-

жений в элементарных промежутках расчетной модели (нормального закона и двойного экспоненциального).

Изоляционный промежуток образован двумя электростатическими экранами (радиус закругления 1,2 см, радиус цилиндрической части 5 см). Экраны расположены в цилиндрическом заземленном корпусе на расстоянии 6 см друг от друга. Рабочее давление элегаза 0,35 МПа. Максимальная напряженность поля на высоковольтном электроде равна 44,5 кВ/см при напряжении между электродами 100 кВ. Разрядные напряженности определяются по кривым, полученным экспериментально. Рассмотрены два вида воздействующих на промежуток напряжений: импульс с параметрами 1,2/50 мкс и напряжение промышленной частоты.

Разрядная напряженность при промышленной частоте изменяется в пределах 164-172 кВ/см, что близко к верхней границе выполнения закона подобия разряда (100-200 кВ/см).

При импульсных воздействиях величина  $E_p$  находится в пределах 270-280 кВ/см, что превышает границу выполнения закона подобия.

«Напряженная» площадь поверхности электрода составляет  $S=53 \text{ см}^2$  (50 Гц) и  $S=69 \text{ см}^2$  при импульсном воздействии. Пределы изменения площади расчетных промежутков 8-20  $\text{см}^2$ .

Сочетание значений  $E_p$ ,  $S$  и  $P = 3,5 \text{ МПа}$  позволяет использовать в качестве ФР любой из двух законов (и нормальный, и двойной экспоненциальный).

На рис. 1 и 2 показаны функции распределения разрядных напряжений (для 50 Гц) и кривые эффекта (импульс), рассчитанные методом преобразования масштаба с использованием нормального и двойного экспоненциального законов распределения разрядных напряжений в элементарных промежутках многоэлектродной системы.

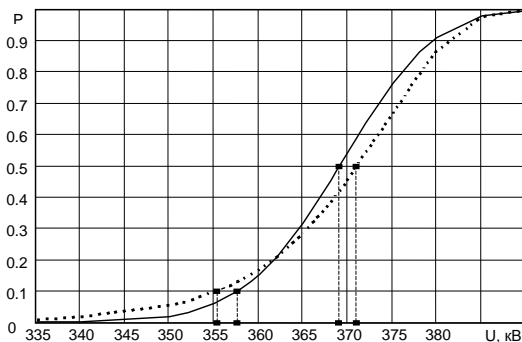


Рис. 1. Функции распределения разрядных напряжений (50 Гц):

— нормальный закон ( $\bar{m}_U = 368,7 \text{ кВ}$ ,  $\bar{\sigma}_U = 8,7 \text{ кВ}$ );

--- двойной экспоненциальный закон ( $\hat{\eta} = 373,7 \text{ кВ}$ ,  $\hat{\gamma} = 8,83 \text{ кВ}$ )

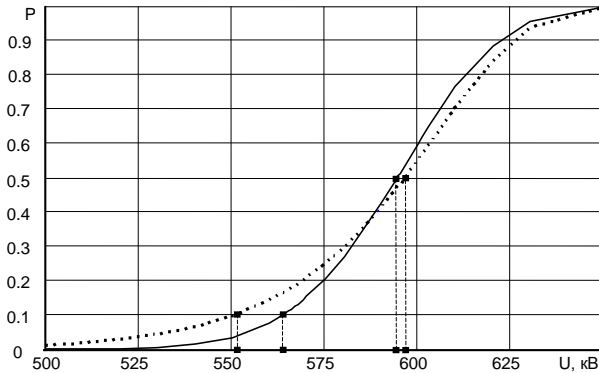


Рис. 2. Кривые эффекта для изоляционного промежутка:

— нормальный закон ( $\bar{m}_U = 594.6$  кВ,  $\bar{\delta}_U = 21.12$  кВ);

--- двойной экспоненциальный закон ( $\bar{\eta} = 605.35$  кВ,  $\bar{\gamma} = 25.03$  кВ)

Анализ результатов показывает, что при двойном экспоненциальном законе величина выдерживаемого напряжения сдвигается в сторону меньших, более безопасных для изоляции значений при обоих видах воздействующего напряжения (50 Гц и импульс).

В то же время 50 %-е разрядные напряжения, найденные по кривым двойного экспоненциального распределения, несколько *больше*, чем в случае нормального закона.

Практика применения закона преобразования масштаба к анализу разрядных напряжений элегазовых изоляционных промежутков позволят рекомендовать в качестве ФР разрядных напряжений двойной экспоненциальный закон, т.к.

во-первых в этом случае квантили низких порядков (в частности, выдерживаемое напряжение) соответствуют более низким, безопасным для изоляции значениям; во-вторых, двойной экспоненциальный закон более удобен в применении, поскольку не требует для расчета вероятностей специальных функций, таких как интеграл вероятности, определяемых по таблицам или через разложение в ряд; в-третьих, при преобразовании масштаба величина, характеризующая разброс разрядных напряжений не изменяется и, кроме того, при идентичных элементарных промежутках сохраняется тип распределения напряжений в преобразованном промежутке.

### Литература

1. **Состояние** и перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения / В.Н. Вариводов, Г.С. Белкин / Электричество. 200 л. – № 9. – С. 24-29.
2. **Расчет** электрической прочности изоляционных конструкций в элегазовых КРУ / В.Н. Борин / Электричество. – 1976. – № 9. – С. 51-53.

## **Особенности грозоповреждаемости распределительной сети 6-10 кВ и предложения по усовершенствованию молниезащиты (на примере Московской энергосистемы)**

Одной из важнейших задач по обеспечению надежности энергосистемы является защита электрооборудования от атмосферных перенапряжений. В частности, в Московской энергосистеме атмосферные перенапряжения являются причиной, в среднем, от 1 до 4% повреждений электрооборудования всех классов напряжения в год, что играет значительную роль в аварийности. Грозоповреждения электрооборудования имеют тяжелые последствия и приводят к длительным перерывам в электроснабжении потребителей, значительному недоотпуску электроэнергии. Большую часть (до 80-90%) всех грозовых отказов составляют повреждения в распределительной сети 6-10 кВ. Это совпадает и с данными статистики по РАО «ЕЭС России» [1].

Автором впервые были обобщены и проанализированы многолетние данные по грозоповреждаемости распределительной сети 6-10 кВ «Мосэнерго» с 1982 по 2005 г., а также система сбора данных по грозоповреждаемости на предприятии энергетики.

Сбор и анализ данных по грозовым повреждениям распределительной сети связан с определенными сложностями. Это обусловлено особенностями сети: ее разветвленностью, большим количеством оборудования наряду с нехваткой обслуживающего персонала, особенностями диспетчерского управления в районах распределительной сети.

Не все повреждения электрооборудования распределительной сети, произошедшие в грозу (или учтенные после прохождения грозового фронта), связаны с грозовыми воздействиями. Поскольку гроза почти всегда сопровождается такими стихийными явлениями, как ливневые дожди и порывистый ветер, значительная часть повреждений электрооборудования распределительной сети вызвана «сопутствующими» причинами (падение деревьев и опор, сжигание проводов, перекрытие изоляции трансформаторных подстанций и т.п.). Каждый случай повреждения электрооборудования во время грозы требует расследования.

С другой стороны, не всегда анализируются отключения электрооборудования распределительной сети, не связанные с повреждениями. Из-за низкой импульсной прочности изоляция распределительных сетей подвержена перекрытиям от индуцированных перенапряжений при разряде молнии вблизи линии. При отсутствии повреждений оборудования линия может быть включена, при этом не определяются возможные причины отключения. В качестве «грозовых» учитываются только инциденты, связанные с повреждением электрооборудования.

Результаты анализа многолетней грозоповреждаемости распределительной сети показывают, что наибольшая часть повреждений относится к

оборудованию ВЛ 6-10 кВ (около 54% всех повреждений). Порядка 14% составляют повреждения опорно-стержневой и проходной изоляции ТП 6-10 кВ, значительно реже повреждаются от атмосферных перенапряжений коммутационные аппараты и изоляция кабельных воронок (6 и 8% соответственно).

Значительную долю среди зафиксированных повреждений составляют повреждения всех видов оборудования «по невыясненным причинам» (до 18%). Это повреждения, которые было сложно идентифицировать по признакам, характерным для грозового воздействия (расщепление, пережог, перекрытие и т.п.). С 1995 г. в «Мосэнерго» такие повреждения не относят к «грозовым». Они могли быть вызваны как старением оборудования, недостатками эксплуатации, так и воздействиями сторонних лиц.

При анализе грозоповреждений определяют характер грозовых воздействий, а также причины, приведшие к отключению оборудования.

Так, повреждения ВЛ 6-10 кВ можно разделить по виду грозовых воздействий:

- прямой удар молнии в опору (сопровождается расщеплением, выпадением крюков, скоб, срывом вязок);
- прямой удар молнии в опору с перекрытием на фазный провод (повреждение изоляции, разрядников);
- поражение фазного провода (обрыв, пережог провода, перекрытие изоляции).

Наиболее распространенными причинами грозоповреждений являются несоответствие схемы молниезащиты требованиям нормативных документов (защита отдельных точек сети с ослабленной изоляцией или с повышенными требованиями по надежности), износ основного и молниезащитного оборудования, недостатки монтажа и эксплуатации.

В распределительной сети могут иметь место случаи повторных повреждений оборудования одного и того же фидера (присоединения), как в течение одного грозового сезона, так и нескольких. Вероятными причинами такого явления могут быть особенности схемы конкретного присоединения, характер рельефа местности. Требуется разработка мероприятий по молниезащите для каждого конкретного случая (усиление молниезащиты, замена оборудования).

В качестве мер по повышению надежности молниезащиты распределительной сети, помимо традиционных организационных мероприятий (ревизия, ремонт, замена оборудования), предлагается использовать накопленный опыт по молниезащите систем высокого напряжения, а также новые технические решения.

К предлагаемым мерам можно отнести: совершенствование схем молниезащиты на основе унифицированных поопорных схем распределительной сети; усовершенствование контроля состояния оборудования ТП 6-10 кВ; внедрение базы данных и программы для ЭВМ, позволяющих оценить параметры сети и ее «узкие места»; применение нового оборудования (замена разрядников на более современные ОПН (с обоснованием), применение длинно-искровых разрядников (РДИП), изолированных и защищенных проводов).

### Литература

1. **Анализ** причин технологических нарушений в работе электроустановок // Ежегодные выпуски. Союзтехэнерго. Служба передового опыта ОРГРЭС. – М., 1990-1998.
2. **Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С.** Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. **Руководство** по защите электрических сетей 6-1150кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под ред. Н.Н. Тиходеева. РД 153-34.3-35.125-99. – СПб.: Издательство ПЭИПК, 1999.
4. **Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д.** Современная грозозащита распределительных воздушных линий 6, 10 кВ длинно-искровыми разрядниками // Электро. – 2006. – №1.

УДК 621.31.031

О.А. БУШУЕВА, к.т.н., проф., Д.А. ПОЛКОШНИКОВ, студ.  
(ИГЭУ)

## Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в электрических сетях

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в настоящее время активно замещают кабели с бумажной изоляцией в классах среднего и высокого напряжения и предназначены для передачи и распределения электроэнергии на объектах с чрезвычайно высокими уровнями энергопотребления и плотностью нагрузки (сети энергосистем, городов и промышленных предприятий).

Своими уникальными свойствами СПЭ кабели обязаны применяемому изоляционному материалу. Помимо хороших диэлектрических свойств, изоляция из СПЭ обладает большим, чем у других материалов, диапазоном рабочих температур и отличными механическими характеристиками.

Основное преимущество СПЭ кабелей перед бумажными – низкая повреждаемость. По зарубежным источникам, процент электрических пробоев СПЭ кабелей на 2-3 порядка ниже.

Конструкция СПЭ кабелей так же значительно отличается от традиционной. В основном кабели выпускаются в одножильном исполнении, а применение различных типов оболочек и возможность герметизации позволяет использовать кабель как для прокладки в земле, так и для кабельных сооружений, в том числе – при групповой прокладке.

Обладая хорошими эксплуатационными свойствами в некоторых случаях лучшими, чем у кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена просты в монтаже, а главное имеют короткий цикл изготовления и сравнительно низкую себестоимость.

Учитывая, что уже разработаны специальные муфты для осуществления соединений между кабелями с бумажно-пропитанной изоля-

цией и изоляцией из сшитого ПЭ, применение данных кабелей возможно не только при прокладке новых линий, но и при ремонте существующих.

Сравнивая традиционные и СПЭ кабели по технико-экономическим показателям, можно определить сферы, где применение СПЭ кабеля может быть наиболее целесообразно. Это сети с напряжениями 10, 35, 110, 220 кВ.

При наличии требований по нераспространению горения, рекомендуется применять кабели с оболочкой из ПВХ пластика пониженной горючести, который прошел соответствующие испытания и имеет сертификат на соответствие нормам пожарной безопасности.

В табл. 1 приводятся некоторые сравнительные характеристики кабелей с изоляцией из СПЭ и кабелей с бумажной изоляцией.

Таблица 1. Сравнительные характеристики

Основные показатели	Вид изоляции кабелей	
	пропитанная бумажная	СПЭ
1. Длительно допустимая рабочая температура, °С	70	90
2. Температура при перегрузках, °С	75	130
3. Стойкость к токам КЗ, °С	200	250
4. Нагрузочная способность, %		
- при прокладке в земле	100	117
- при прокладке в воздухе	100	120
5. Разность уровней при прокладке, м	J15	без ограничения
6. Трудоемкость при монтажах и ремонтах	высокая	низкая
7. Показатели надежности – удельная повреждаемость, шт./100 км год		
- в свинцовых оболочках	~ 6	
- в алюминиевых оболочках	~ 17	в 10-15 раз ниже

Кабели с изоляцией из СПЭ являются наиболее перспективными при строительстве и реконструкции кабельных линий 6-220 кВ. Благодаря уникальным свойствам, высокой электрической прочности изоляции, низкой повреждаемости, большой пропускной способности, длительному сроку службы, их применение становится не только технически целесообразным, но и экономически выгодным.

Кабели с изоляцией из СПЭ изготавливаются в настоящее время на многих заводах России.

### Литература

1. **Справочник** по кабелям. – М.: Электроника, 2005.
2. **Правила** устройства электроустановок. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.

УДК 621.311.019

О.А. БУШУЕВА, к.т.н., проф., А.С. НОВИКОВ, студ.  
(ИГЭУ)

## **Применение статических тиристорных компенсаторов в системах электроснабжения промышленных предприятий**

Объектом данного исследования является система электроснабжения одного из крупнейших металлургических предприятий.

На предприятии имеется большое количество мощных потребителей электрической энергии с резкопеременным режимом работы, а также полупроводниковых преобразователей, которые влияют на качество электроэнергии.

При работе таких нагрузок снижается качество электроэнергии, которое проявляется в виде колебаний напряжения и отклонений его от номинального значения, а также в искажении синусоидальности кривой напряжения.

Наиболее мощными установками прокатных цехов являются непрерывные многоклетевые станы для горячей прокатки листа. К таким установкам относится стан 2000, прокатывающий тяжелые слябы массой до 36 т на полосы толщиной 1.2...12 мм и шириной до 1850 мм. Он имеет 12 клетей общей мощностью 238 МВт. На стане установлены электродвигатели постоянного тока мощностью до 11.4 МВт. Все приводы постоянного тока имеют индивидуальные тиристорные преобразователи.

Колебания напряжения, возникающие при работе стана, практически пропорциональны колебаниям реактивной мощности. Фронт наброса и сброса реактивной мощности составляет для реверсивных станов горячего проката (блужинги, слябинги) до 200 Мвар/с, для непрерывных станов горячего проката до 400 Мвар/с [1].

Одними из средств по ограничению колебаний напряжения являются рациональное построение схемы электроснабжения и применение компенсирующих устройств. В листопрокатном цехе №2 применены схемные решения и установлены 8 синхронных компенсаторов марки СК-10000-8 (по 4 на каждую секцию шин) с номинальной располагаемой реактивной мощностью в режиме генерации 7700 квар.

Все вышеперечисленные мероприятия не обеспечивают требуемый уровень колебаний напряжения в сети, что часто приводит к браку продукции и остановке стана. Частота колебаний достигает 48 колебаний в минуту, при амплитуде до 2.5 кВ (на шинах 10 кВ ГПП-11).

Эти задачи могут быть комплексно решены с помощью применения статических тиристорных компенсаторов (СТК), имеющих более высокое быстродействие, чем синхронные компенсаторы [2].

СТК – комбинированная электроустановка, содержащая одну или несколько тиристорно-реакторных групп (ТРГ), фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) и систему автоматического управления СТК [2].



На рис.1 приведена предложенная принципиальная схема СТК для стана 2000.

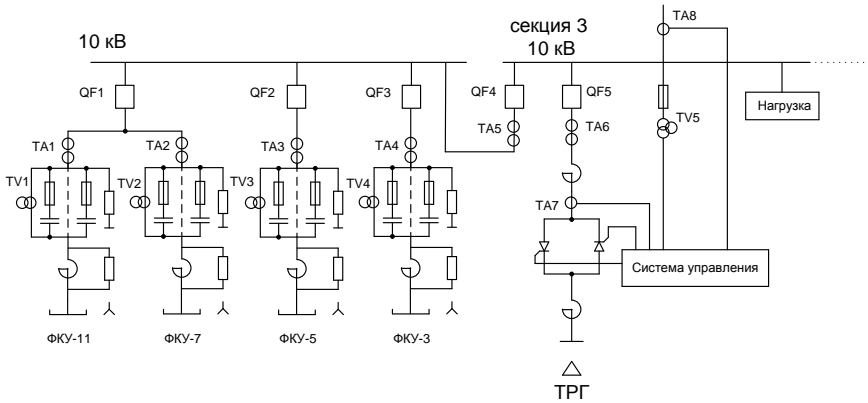


Рис. 1. Принципиальная схема СТК для стана 2000

Состав СТК и выбор его мощности обоснованы расчетами.

К установке рекомендованы два СТК типа ТКРМ-40/10.5-11110-У1 номинальной мощностью 40 Мвар.

ТКРМ выполнены по схеме косвенной компенсации, источником опережающего тока являются силовые фильтры высших гармоник, стабилизирующим элементом является полупроводниковый стабилизатор мощности (ПСМ) со встречноключенными тиристорами, которые вместе с компенсирующими реакторами собраны в треугольник.

### Литература

1. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

## Компенсация реактивной мощности в цеховых сетях промышленных предприятий с применением новых технических средств

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.

Проведен сравнительный анализ характеристик различных источников реактивной мощности (ИРМ), применяемых в сетях энергосистем и промышленных предприятий.

На промышленных предприятиях в цеховых сетях широкое применение нашли схемы с конденсаторными батареями (КБ). Эти схемы разнообразны: схемы с нерегулируемыми КБ, когда мощность КБ не изменяется в зависимости от изменения нагрузки, схемы со ступенчатым регулированием мощности КБ за счет использования различных способов автоматического регулирования их мощности.

С увеличением числа ступеней регулирования мощности КБ усложняется система управления, поэтому число ступеней, как правило, не превышает трех.

Плавное регулирование мощности позволяет осуществить схема рис. 1, в которой применяется регулируемая индуктивность (реактор) и регулируемая емкость (КБ).

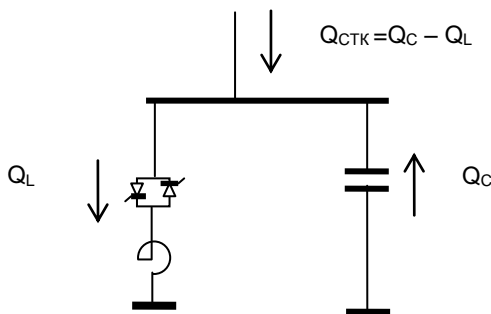


Рис. 1. Принципиальная схема СТК

В этой схеме реактивная мощность реактора ( $Q_L$ ) плавно изменяется за счет изменения фазного угла управления тиристорами.

В этом случае амплитуда тока в индуктивности изменяется по выражению [1].

$$I_L = \frac{U_\phi}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{Sin} \alpha \right), \quad (1)$$

где  $U_\phi$  – амплитудное значение фазного напряжения сети,  $L$  – индуктивность реактора,  $\alpha$  – угол регулирования в радианах,  $\omega$  – угловая частота сети питания.

Увеличение угла управления тиристорами для уменьшения тока в индуктивности, т.е. уменьшение  $Q_L$ , приводит к генерации высших гармоник.

С учетом появления гармоник амплитуда тока в индуктивности определяется по выражению [2]

$$I_{L,n} = \frac{4U_\phi}{\omega L \pi} \left[ \frac{\text{Sin} \alpha - n \text{Cos} \alpha \text{Sin} \alpha}{n(n^2 - 1)} \right], \quad (2)$$

где  $n$  – номер гармоники.

Такие схемы, содержащие индуктивность и емкость, получили название СТК (статический тиристорный компенсатор).

Различные схемы включения реакторов и КБ позволяют получить комбинированные схемы.

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. 2 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 ( $Q_L=Q_{C1}$ ).

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.

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 тиристоров в регуляторе VS2

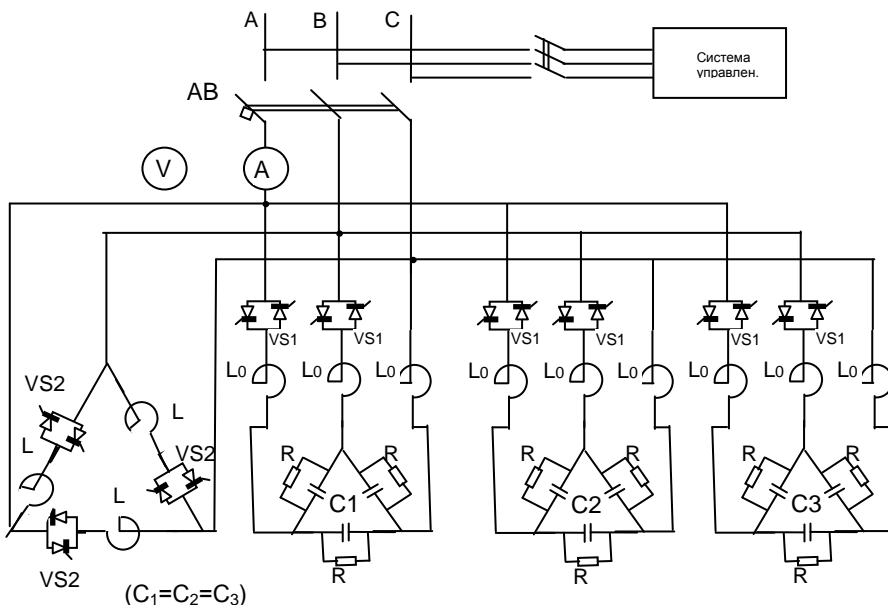


Рис. 2. Схема комбинированного регулируемого источника реактивной мощности

### Литература

1. Мокин Б.И. Автоматические регуляторы в электрических сетях. – К.: Техника, 1985.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Прия Р., Хевсуриани И.М., Шевченко В.В. Эффективное устройство регулирования уровня напряжения в цеховых сетях промышленных предприятий: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Электропотребление, электроснабжение, электрооборудование». – Оренбург, 1999.

## **Использование моделей электропотребления для электросбережения на прядильных фабриках**

В настоящее время большинство прядильных фабрик работают на морально и физически устаревшем оборудовании выпуска начала 80-х годов прошлого столетия. Электропотребление оборудования зависит не только от энергетических факторов, технических параметров заправки и ассортимента продукции, но и от технического состояния оборудования. Для основных видов прядения разработаны научно обоснованные математических модели, отражающие влияние технических и технологических факторов производства на режимы электропотребления.

С целью повышения эффективности управления режимами электропотребления на различных структурных уровнях прядильных фабрик с использованием математических моделей разработано программное обеспечение моделирования потребления электроэнергии. Оно реализует методику регрессионного анализа данных, алгоритма составления математической модели электропотребления основного оборудования и вспомогательных нужд (освещения, вентиляции и т.д.) а также способ их корректировки. В программном обеспечении предусмотрены также алгоритмы имитационного моделирования электропотребления технологическим процессом, с возможностью корректировки параметров машин, и составления электробаланса для различных производственных уровней, с выводом результатов сравнения с реальными значениями.

Для решения задач по электросбережению на предприятии необходимо иметь расчетные (нормализованные) электробалансы и достоверные фактические на всех уровнях системы электроснабжения от предприятия в целом до отдельного электрооборудования. Расчетные электробалансы учитывают возможности оптимального использования энергии, так как рассчитаны на основе прогрессивных (или средних) норм электропотребления. Фактические электробалансы, полученные с помощью систем учета, отражают реально сложившиеся на предприятии производственные условия и соответствующие им расходы электроэнергии. Сравнение фактических электробалансов (фактического электропотребления) с расчетными электробалансами, позволяет выявить места повышенного электропотребления, определить причины нерационального электропотребления, оценить резервы экономии электроэнергии и разработать мероприятия по снижению электропотребления.

## **Повышение эффективности энергосбережения для предприятий текстильной промышленности**

Одной из причин низкого энергоиспользования в России являются спад промышленного производства, износ оборудования которого достиг 63-75%. Постоянно растет доля стоимости энергоресурсов в структуре затрат на производство продукции. В текстильной отрасли эта величина достигла 30%.

Основой энергосбережения на текстильных предприятиях является расчет нормативного расхода электроэнергии. Применение удельных норм и зависимостей на единицу продукции обречено на неудачу в связи с тем, что удельные нормы определяются для так называемого «эталонного» оборудования. Использование средних удельных норм по отрасли (применение удельных норм одного предприятия на аналогичных предприятиях) также не решает проблему для предприятий, использующих морально и физически устаревшее разнотипное оборудование с различными параметрами заправки и ассортимента.

Существенной особенностью всех норм и зависимостей является то, что уравнения, составленные для конкретного производства (технологии), неприменимы для другого завода с таким же производством. То есть каждое уравнение является индивидуальным и привязано не только к данному предприятию, производству, цеху, но привязано оно и во времени. Поэтому через некоторое время (месяцы, 1-2 года) коэффициенты меняются. Меняются они от изменения ритмичности работы, объема выпускаемой продукции, технических параметров заправки и ассортимента продукции, а также от изменения технического состояния оборудования.

Одним из основных направлений, позволяющим на деле осуществить реальное энергосбережение, является организация учета электроэнергии с использованием измерительных комплексов или современных технических средств измерения параметров электропотребления на всех структурных уровнях предприятия обеспечивающего точность, достаточность и оперативность измерений.

Для полученных реальных данных электропотребления используется математический аппарат исследования, который позволяет выделять нормальные технологические процессы, режимы работы с переменной технологической нагрузкой, суточные, недельные, месячные колебания и определить величины рационального электропотребления на всех структурных уровнях предприятия для соответствующего технического состояния оборудования.

УДК 621.316.1

А.И. КУЛЕШОВ, к.т.н., доц., С.В. БАЛДОВ ассист.,  
(ИГЭУ)  
А.Г. МАКАРОВ, эксперт, И.С. ТКАЧЕНКО  
(ОАО «Центр Качества Энергии», Москва)

## Расчет допустимых отклонений напряжений в центрах питания распределительных электрических сетей

Отклонения напряжения на зажимах электроприемников (ЭП) регламентируются [1], согласно которому нормально допустимые отклонения должны быть  $\pm 5\%$ . С другой стороны [2] требует, чтобы устройства регулирования напряжения должны обеспечивать поддержание напряжения на тех шинах напряжение 3-20 кВ подстанций, к которым присоединены распределительные сети, в пределах не ниже  $+105\%$  номинального в период наибольших нагрузок и не выше  $100\%$  номинального в период наименьших нагрузок. Это, так называемое, встречное регулирование.

Требования [1] и [2] одновременно могут выполняться только при условии, что суммарная потеря напряжения в распределительной сети от шин центров питания (ЦП) до зажимов наиболее удаленного ЭП будет не более  $10\%$ . Однако в большинстве электрических сетей ЭП непосредственно подключаются только к сети 0,38/0,22 кВ. Кроме того, в этих сетях наблюдается наибольшая потеря напряжения. Если учесть это обстоятельство, то требование [2] о встречном регулировании следует относить к шинам трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ (ТП). Однако трансформаторы ТП имеют возможность только сезонного регулирования напряжения и в довольно узких пределах  $\pm 2 \times 2,5\%$  за счет изменения ответвлений ПБВ. В этих условиях регулирование напряжения может осуществляться только на ЦП за счет изменения ответвлений РПН.

Суммарная потеря напряжения от источника питания до характерного ЭП  $\Delta U_{ЭП}$  определяется по выражению[3]:

$$\Delta U_{ЭП} = \Delta U_T + \Delta U_{СН} + \Delta U_{НН} - \Delta E_{ПБВ}, \quad (1)$$

где  $\Delta U_T$  – потеря напряжения в трансформаторе ТП, от которого питается характерный ЭП;  $\Delta U_{СН}$  – потеря напряжения в линиях среднего напряжения (10-6 кВ) от центра питания до ТП, от которой питается характерный ЭП;  $\Delta U_{НН}$  – потеря напряжения в сети 0,38/0,22 кВ от шин ТП до характерного ЭП;  $\Delta E_{ПБВ}$  – добавка напряжения за счет сезонного переключения ответвлений ПБВ.

Т.к. трансформаторы ТП изготавливаются с номинальным напряжением вторичной обмотки, превышающим на  $5\%$  номинальное напряжение сети, т.е. нулевому ответвлению ПБВ соответствует  $\Delta E_{ПБВ} = 5\%$ . Если на трансформаторе ТП имеется ПБВ с диапазоном регулирования  $\pm 2 \times 2,5\%$ , то нулевому значению  $\Delta E_{ПБВ}$  соответствует «минус» второе ответвление.

Задаваясь допустимыми значениями напряжения  $\Delta U_{доп}$  на зажимах характерных ЭП +5% для «ближайшего» к ЦП ЭП и -5% для «удаленного» можно определить уровень напряжения, который необходимо поддерживать на ЦП, чтобы обеспечить требования [1]. Для получения диапазона допустимых напряжений по [1] необходимо расчеты по (1) выполнить для режимов максимальных и минимальных нагрузок соответственно зимнего и летнего периодов.

Приведенная в [3] методика расчета допустимых диапазонов установившегося отклонения напряжения в распределительных электрических сетях составляющих потерь напряжения в (1) ориентирована на применение упрощенных «ручных» методов расчета с упрощенным представлением сети 0,38 кВ. Расчеты выполняются «в токах», что не учитывает нелинейность уравнений установившегося режима.

В данной работе были выполнены расчеты и анализ допустимых диапазонов (ДД) изменения напряжения в реальных распределительных электрических сетях 10/0,4 кВ с использованием программы расчета установившегося режима электрических сетей. В программе реализовано решение нелинейных уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности методом Ньютона. Расчеты выполнялись совместно для питающей сети 10 кВ и распределительной сети 0,38 кВ, что позволяет автоматически выполнять баланс мощности по всем узлом рассчитываемой сети, включая и шины напряжения 0,38 кВ ТП.

В отличие от методики проведения расчетов [3] в данной работе выполнялся схемотехнический расчет, как сети СН (10-6 кВ), так и сети НН (0,38кВ), однако это потребовало задание значений узловых мощностей во всех узлах схемы.

Получение таких данных связано с большими трудозатратами по сбору данных о нагрузках. Обычно измеряется ток на головном участке фидера 0,38 кВ, следовательно, данный ток необходимо каким-то образом распределить между нагрузками узлов. В проведенных расчетах нагрузка узлов распределялась пропорционально установленным мощностям из условия, что расчетный ток головного участка фидера равен измеренному значению.

В рассчитываемых сетях отсутствовали ЭП, подключенные на напряжение 10 кВ. При выполнении расчетов на трансформаторах ТП изначально моделировалось минус второе ответвление ПБВ для режима максимальных нагрузок. Далее, при необходимости, за счет изменялся номера ответвления ПБВ отдельных трансформаторов, компенсировалась потеря напряжения в линиях СН и ТП до шин НН этих трансформаторов. При расчетах режимов минимальных нагрузок подобранные таким образом номера ответвлений ПБВ оставались неизменными. Такой подход к выбору номера ответвления ПБВ приводит к увеличению верхней границы ДД напряжения на ЦП, а это, в свою очередь, снижает потери мощности и энергии.

Расчеты выполнялись при следующих условиях: рассчитывались максимальные и минимальные нагрузки зимнего и летнего периодов. При



заданном уровне нагрузок верхняя граница ДД напряжения на шинах ЦП подбиралась таким образом, чтобы на ближнем ЭП напряжение было бы равным 105% номинального, а нижняя граница из условия, что бы на удаленном ЭП напряжение было бы равно 95% номинального. ДД изменения напряжения для всех режимов от максимальных нагрузок до минимальных определялся как пересечение ДД режимов максимальных и минимальных нагрузок.

В результате этих расчетов определялись и ДД изменения напряжения на шинах выбранных ТП.

Результаты расчетов показали, что:

- использование схмотехнических расчетов с использованием программ расчета установившегося режима позволяет более точно учесть нелинейность нагрузки и балансы мощности для всех узлов расчетной схемы.

- использование схмотехнических расчетов для определения ДД изменения напряжения на ЦП и шинах ТП увеличивает точность данных расчетов, однако при этом необходимо решать проблему неопределенности данных о нагрузках сети;

- верхняя граница ДД увеличивается с увеличением нагрузки сети;

- ДД сужаются при увеличении величины потерь напряжения в распределительной сети между «ближайшим» и «удаленным» ЭП. В пределе этот диапазон сужается в точку при величине потери напряжения 10 %;

- допустимые отклонения напряжения из условия соблюдения ГОСТ 13109-97 к величине отклонения напряжения на зажимах ЭП в ряде случаев не соответствуют требованиям ПУЭ по обеспечению встречного регулирования напряжения на шинах 3-20 кВ станций и подстанций.

- изменение положения ответвления ПБВ на ТП приводит к изменению границ ДД, однако при этом ширина ДД изменяется незначительно.

### Литература

1. **Гост 13109-97** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ИПК издательство стандартов, 2002.
2. **Правила** устройства электроустановок. Раздел 1. Общие правила. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Главы 7.5, 7.6, 7.10. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 176 с.
3. **СТП-01.03-2006** Стандарт предприятия. Определение пунктов контроля в распределительной электрической сети и допустимого диапазона установившегося отклонения напряжения в этих пунктах.

## «Рыночный» и «нерыночный» методы технико-экономического обоснования развития электрических сетей

При технико-экономическом сравнении вариантов развития электрических сетей часто применимо допущение об ограничении срока строительства одним годом и эксплуатации объекта с неизменными издержками. В такой постановке показатели сравнительной экономической эффективности записываются наиболее просто.

Приведенные затраты [1] определяются формулой

$$Z = \frac{I}{T_H} \cdot K + И, \quad (1)$$

а суммарные дисконтированные затраты [1] –

$$DZ = K + И \cdot \sum_{t=1}^T \frac{I}{(I + E)^t}, \quad (2)$$

где  $K$  – капиталовложения;  $И$  – ежегодные издержки;  $T$  – расчетный срок службы объекта;  $E$  – норма дисконта;  $T_H$  – нормативный срок окупаемости дополнительных капиталовложений.

Утвердилось мнение, что показатель (1), применявшийся в условиях плановой экономики, устарел и в рыночной экономике должен быть заменен показателем (2). Однако можно доказать, что оба показателя совершенно эквивалентны друг другу и дают одинаковые результаты, если выполняется условие

$$T_H = \frac{a - a^{T+1}}{1 - a}, \quad a = \frac{I}{I + E}. \quad (3)$$

Действительно, слагаемые суммы показателя (2) представляют собой геометрическую прогрессию:

$$\frac{I}{I + E}, \frac{I}{(I + E)^2}, \dots, \frac{I}{(I + E)^T}$$

с первым членом и знаменателем прогрессии

$$a = \frac{I}{I + E}.$$

Сумма этой геометрической прогрессии определится как

$$\sum_{t=1}^T \frac{I}{(I + E)^t} = \frac{a - a^{T+1}}{1 - a}.$$

Из показателя (2) следует, что эта сумма имеет размерность времени и ей может быть приписано определенное содержание. Действительно, данную величину можно рассматривать как некоторое приведенное время  $DT$  эксплуатации объекта, обеспечивающее дисконтирование неизменных по годам издержек  $I$ .

С учетом изложенного показатель (2) принимает удобный для расчетов вид

$$DZ = K + DT \cdot I \quad (4)$$

или

$$\frac{DZ}{DT} = \frac{I}{DT} \cdot K + I. \quad (5)$$

Последнее выражение представляет собой тождественную запись приведенных затрат (1) при

$$Z = \frac{DZ}{DT}, \quad T_H = DT, \quad (6)$$

откуда следует заключение (3).

Таким образом, если нормативный срок окупаемости  $T_H$  в приведенных затратах (1) определять в каждом конкретном случае как функцию расчетного срока  $T$  службы объекта и нормы дисконта  $E$  по выражению (3), а не нормировать  $T_H$  заранее из общей стратегии развития всего народного хозяйства, то метод приведенных затрат оказывается не менее «рыночным», чем метод суммарных дисконтированных затрат, причем результаты оценки сравнительной экономической эффективности вариантов будут совершенно одинаковыми.

Из полученных результатов могут быть сделаны выводы.

1. В настоящих условиях эффективность инвестиций в электрические сети оценивается формально так же, как и в плановой экономике, при этом регламентируются [2] величины  $E$  и  $T$  (вместо  $T_H$ ). Однако  $T_H$  определяется выражением (3). Этот срок составит 4...6 лет, если ориентироваться на рекомендованные [2] значения  $E$  и  $T$ . Полученная величина  $T_H$  значительно ниже прежнего значения (8,3 года), что соответствует смещению в настоящих условиях оптимальных решений в пользу менее капиталоемких вариантов.

2. Не следует исключать из обращения как устаревшую обширную учебную литературу по электрическим сетям, использующую метод приведенных затрат. Требуется всего лишь раскрыть связь между рассмотренными выше показателями.

### Литература

1. Волькенау И.М. Экономика формирования электроэнергетических систем / И.М. Волькенау, А.Н. Зейлигер, Л.Д. Хабачев. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.

УДК 621.311

А.А. БРАТОЛЮБОВ, к.т.н., доц., Н.А. ОГОРЕЛЫШЕВ, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ)

## Применение метода непрерывного динамического утяжеления для исследования статической устойчивости энергосистемы

Для оценки нормируемого запаса статической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) необходимо выявлять её предел статической устойчивости. С этой целью, в отличие от традиционного утяжеления режима ЭЭС путем расчета серии её установившихся режимов, составляющих ту или иную траекторию утяжеления, в работе [1] был предложен метод непрерывного динамического утяжеления режима, позволяющий объединить задачу утяжеления и задачу оценки устойчивости путем интегрирования полных нелинейных уравнений, описывающих переходные электромеханические процессы ЭЭС.

Предлагается для более четкого выявления предела статической устойчивости наложить на процесс непрерывного динамического утяжеления режима периодические импульсы небольшой амплитуды, играющие роль тестирующих малых возмущающих воздействий.

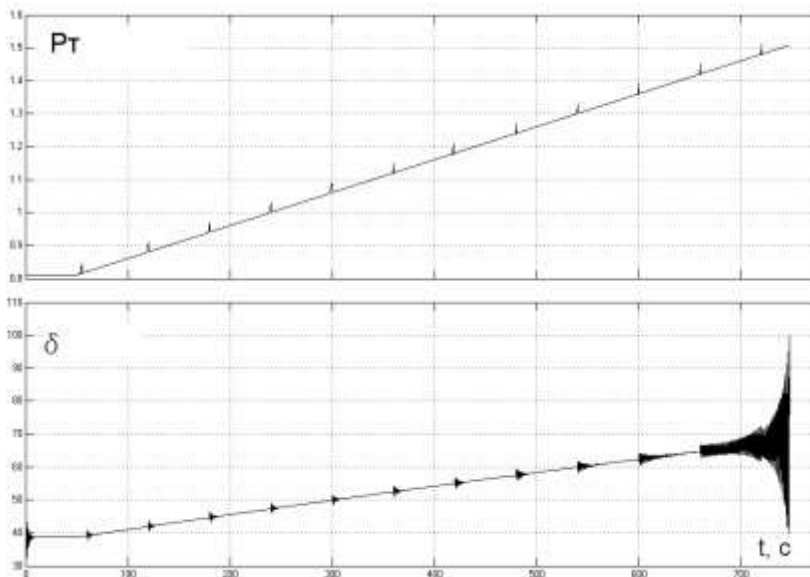


Рис. 1

Результат реализации данного метода по выявлению предела статической устойчивости для ОЭС Северо-Запада в программном комплексе МУСТАНГ представлен на рис. 2. Здесь кривая 1 демонстрирует задание по изменению мощности турбин одной из ГРЭС, обеспечивающее непрерывное динамическое утяжеление режима этой станции, а кривая 2 отображает переходный процесс отклика взаимного угла роторов машин этой ГРЭС по отношению к примыкающей системе, по связям с которой оценивался предел статической устойчивости.

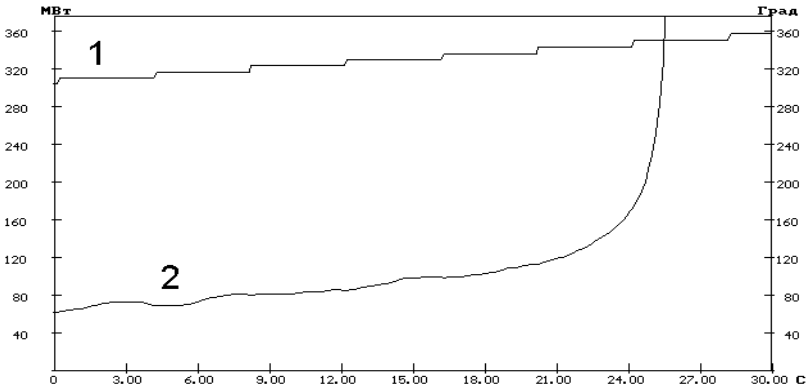


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что нарушение устойчивости в данном случае носит аperiodический характер при достижении предела с углом порядка  $110^\circ$  и мощностью станции около 340 МВт.

### Литература

1. Братолобов А.А. Выявление предела статической устойчивости электроэнергетической системы методом непрерывного динамического утяжеления режима / А.А. Братолобов, Н.А. Огорельшев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (10-е Бенардосовские чтения), т.1: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., 6-8 июня 2001 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. – С.53.

УДК 621.311

Н.А. ОГОРЕЛЫШЕВ, к.т.н., доц., А.А. БРАТОЛЮБОВ, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ)

## **Моделирование субгармонического автоколебательного процесса и его срыва при кратковременных замыканиях в сети 35 кВ**

После кратковременных однофазных замыканий в сети 35 кВ с измерительными трансформаторами напряжения (ТН) типа ЗНОМ-35 возможно возникновение устойчивого субгармонического процесса автоколебаний, который обычно завершается повреждением этих трансформаторов напряжения. Повреждения носят характер тепловых разрушений и сопровождаются выбросом масла и перегоранием предохранителей в первичных цепях ТН [1]. Хотя эти явления известны давно, однако, они не перестают беспокоить обслуживающий персонал до настоящего времени. В частности, обслуживающий персонал отмечает в некоторых случаях повышение напряжения по отношению к земле во все трех фазах, которое после ряда переключений может пропадать. Аналогичные явления наблюдаются и в период грозовой деятельности в районе. В этих случаях могут возникать затруднения в выработке целенаправленных действий персонала по срыву нежелательного процесса. Поэтому необходимо знать основные черты явления.

Помочь в этом может моделирование на базе SIMULINK системы MATLAB, а именно, в пакете Power SYSTEM, приспособленном для решения электроэнергетических задач. В качестве примера взята сеть 35 кВ общей длиной 50 км с ТН типа ЗНОМ-35 подключенными в каждую фазу с учетом насыщения. Замыкание на землю длительностью 0.03 с предусматривалось в фазе «С». Результаты моделирования представлены на рис. 1. В момент короткого замыкания хорошо видно повышение напряжения неповрежденных фаз «А», «В» до их линейного значения. И далее, начиная с момента отключения повреждения, без изменения амплитуды начинается субгармонический процесс с частотой приблизительно 1/3 промышленной частоты. Этот процесс продолжается долго, поддерживаясь насыщением трех ТН разных фаз. Сам субгармонический процесс развивается по нулевой последовательности, о чем свидетельствует скачкообразное изменение частоты напряжения нейтралей источника питания с 50 до  $\sim 50/3$  Гц. Токи при субгармоническом процессе существенно повышаются, что очевидно и вызывает тепловое разрушение измерительных трансформаторов, причем поврежденным может оказаться любой из трёх трансформаторов фаз А, В, С. Включение активного сопротивления в цепь разомкнутого треугольника ТН приводит к срыву возникающих субгармонических колебаний, а результаты его моделирования представлены на рис. 2. Практически процесс затухания можно сделать достаточно быстрым ( $\sim 1$  с) за счет подбора активного сопротивления.

Аналогичного результата можно добиться путем кратковременного подключения к нейтрали активного сопротивления.

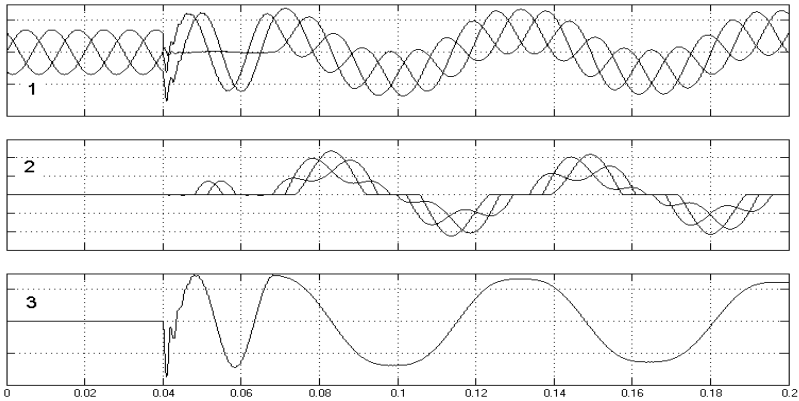


Рис. 1. Результаты моделирования появления субгармонических колебаний в сети 35 кВ при кратковременном замыкании фазы С на землю: 1 – фазные напряжения; 2 – токи в фазах ТН; 3 – напряжение нейтрали.

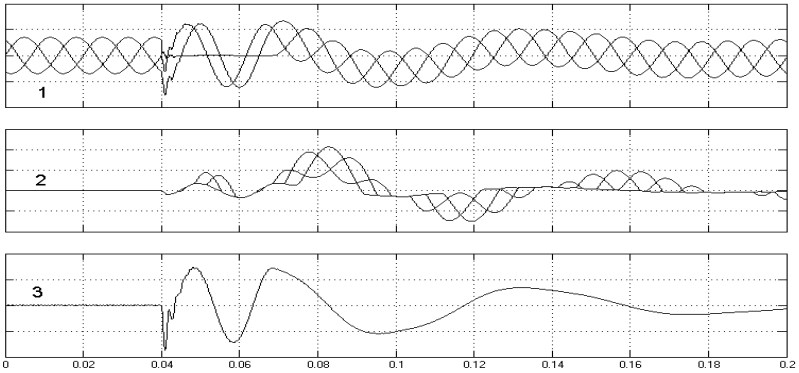


Рис. 2. Результаты моделирования срыва субгармонических колебаний в сети 35 кВ при подключении активного сопротивления в разомкнутый треугольник ТН: 1 – фазные напряжения; 2 – токи в фазах ТН; 3 – напряжение нейтрали.

#### Литература

1. Шаргородский В.Л. Автоколебательный процесс – причина повреждения трансформаторов напряжения / В.Л. Шаргородский // Электрические станции. – 1963. – № 5. – С.59-64.

## **Подсекция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И В ЭНЕРГЕТИКЕ»**

УДК 621.321

Е.В. БАРОЧКИН, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ)

### **Алгоритм структурно-параметрического синтеза систем теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков**

Повышение потребления энергии на душу населения с одновременным ростом численности населения земного шара приводит к росту производства энергии и ставит перед человечеством глобальные проблемы теплового загрязнения окружающей среды, с одной стороны, и истощения разведанных запасов топлива, с другой. В связи с этим особую актуальность приобретает задача повышения эффективности систем генерации и использования энергии. В докладе рассматривается алгоритм структурно-параметрического синтеза систем теплообменных аппаратов и решение на его основе ряда оптимизационных задач.

На первом этапе разработки алгоритма решается задача моделирования теплообмена в ступени поверхностного и смешивающего подогревателя и деаэратора. Для описания всего спектра характерных областей теплообмена для двух теплоносителей разработаны следующие четыре модели: фазовый переход теплоносителей отсутствует (модель 1), фазовый переход только горячего теплоносителя (модель 2), фазовый переход только холодного теплоносителя (модель 3), фазовый переход холодного и горячего теплоносителей (модель 4).

Из решения дифференциальных уравнений теплового и материального баланса найдено матричное описание процесса в ступени для каждой модели. Для унификации и автоматизации составления модели при произвольном задании двух известных параметров теплоносителей два уравнения системы дополняются двумя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные из начальных условий значения параметров теплоносителей.

В ступени смешивающих подогревателей наряду с теплообменом осуществляется массообмен между теплоносителями. В качестве поверхности теплообмена рассматривается суммарная поверхность раздела фаз – поверхность струй.

Особый научный и практический интерес представляет теплообмен в смешивающих аппаратах – деаэраторах, где наряду с нагревом воды осуществляется удаление из нее растворенных газов. Разница температур обуславливает теплообмен между водой и паром, разница концентраций газа – деаэрацию воды. Рассматривается среда, состоящая из четырех компонентов: вода, водяной пар, газ в жидкой и газ в па-



ровой фазе. Считается, что в ступени одновременно протекают следующие процессы: теплообмен между паром и водой, массообмен между паром и водой, массообмен между газом, растворенным в воде, и газом паровой фазы. В качестве определяющей координаты выбирается поверхность теплообмена  $F$ . На элементарном участке  $dF$  вода нагревается за счет теплопередачи от пара и смешения с его конденсатом. Из баланса энергий и массы через элементарную поверхность  $dF$  получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменение температурного напора  $\tau$ , массового расхода теплоносителей  $G$  и концентрации газа в воде ( $c_{g2}$ ) и паре ( $c_{g1}$ ) вдоль определяющей координаты  $F$ .

Обобщенное описание процесса в ступени представляется в виде матричного уравнения

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{X}_0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  – матрица процесса в ступени,  $\mathbf{X}$  – вектор параметров ступени, индекс «0» соответствует входным параметрам.

Для расчета многоступенчатых установок со сложной конфигурацией потоков предлагается метод синтеза модели системы из моделей ее элементов. Матрица-столбец (вектор) признаков  $\mathbf{X}$  составляется из аддитивных параметров теплоносителей, значения которых можно складывать при смешении потоков. Наиболее общий случай соединения ступеней предполагает возможность подачи на вход в  $i$ -й элемент потоков из всех остальных элементов. Пусть на вход в первый элемент подаются потоки холодного и горячего теплоносителя, которые характеризуются набором признаков  $[\mathbf{X}_0]_1$ , индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс тепло-и(или) массообмена описывается матрицей  $\mathbf{B}$ , произведение которой на вектор входных параметров согласно (1) позволяет определить выходные параметры ступени  $[\mathbf{X}]_1 = \mathbf{B}_1[\mathbf{X}_0]_1$ . Для указания направления движения потока после ступени формируется матрица коммутации  $\mathbf{K}_1$ , элементы которой показывают доли потока из первой ступени в  $i$ -ю. Матричное произведение  $\mathbf{K}_i\mathbf{B}_1[\mathbf{X}_0]_1$  определяет параметры потока, подаваемого из первого элемента в  $i$ -й. Очевидно, что на вход в  $i$ -ю ступень могут подаваться потоки из остальных элементов схемы и внешние для установки потоки. Входной вектор признаков для  $i$ -го элемента определится как сумма аддитивных характеристик смешиваемых на входе в него потоков

$$[\mathbf{X}_0]_i = \mathbf{K}_{i1}\mathbf{B}_1[\mathbf{X}_0]_1 + \mathbf{K}_{i2}\mathbf{B}_2[\mathbf{X}_0]_2 + \dots + \mathbf{K}_{in}\mathbf{B}_n[\mathbf{X}_0]_n + [\mathbf{X}_{\text{вх}}]_i, \quad (2)$$

где индекс «вх» соответствует внешним для установки потокам. Уравнения аналогичные (2) записываются для всех ступеней установки в виде системы матричных уравнений

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{T}$  – матрица процесса в установке.

Разработанный алгоритм позволяет синтезировать модель системы теплообменников произвольной структуры с различными параметрами процессов и решать задачи структурно-параметрической оптимизации.

УДК 621.928

В.Е. МИЗОНОВ, д.т.н., проф., И.В. НАВИНСКИЙ, инж., В.С. ЛЕЗНОВ, студ.  
(ИГЭУ)

## **Применение теории цепей Маркова к решению задач массопереноса в поле массовых сил**

В настоящей работе объектом математического моделирования являются одномерные и плоские задачи тепломассопереноса в пористом материале при наличии массовых сил, действующих на диффундирующую среду. Типичным примером такого процесса является сушка в вертикальном положении пористого стержня или пластины, когда сила веса способствует перемещению влаги в нижнюю часть изделия, а с его поверхности происходит тепло- и массоотдача в окружающую среду. Известные интегральные методы расчета кинетики изменения содержания влаги во всем образце в целом не дают полной информации о процессе, поскольку локальные влагосодержания и их градиенты могут существенно влиять на механические свойства и другие характеристики изделия в процессе сушки.

В основу моделирования положена теория цепей Маркова и связанное с ней дискретное (ячеечное) представление состояния процесса. Основным оператором модели является матрица переходных вероятностей, которая строится по одинаковым правилам для температуры и концентрации диффундирующего вещества. Первоначально эта матрица строится для изолированного сечения, когда потоки через ограничивающий его контур равны нулю. Внешний тепло- и массообмен задаются через функции источников (стоков) для периферийных ячеек, примающих к ограничивающему контуру. Также через функции источников задаются потоки теплоты и массы, выделяемые или поглощаемые вследствие химических реакций, а также возникающие в виду связности тепло- и массопереноса. Если свойства вещества зависят от параметров состояния и существенно меняются в течение процесса (нелинейная модель), то переходные матрицы следует пересчитывать на каждом временном переходе.

Для реализации модели разработан универсальный алгоритм и его программное обеспечение. Предложена техника эксперимента, позволяющего определить параметры тепло- и массопереноса для модельного пористого влажного материала. В процессе эксперимента определяется содержание и концентрация влаги в различных зонах образца через фиксированные промежутки времени, что позволяет отслеживать кинетику процесса, а затем восстанавливать параметры модели.

Модель была применена для описания процесса сушки стеновых панелей в автоклавной сушильной камере и дала удовлетворительное совпадение расчетных результатов с его экспериментальными интегральными показателями.

УДК 621.928

В.Е. МИЗОНОВ, д.т.н., проф., Е.А. БАРАНЦЕВА, к.т.н., доц., О.В. ТИХОНОВ, инж.  
(ИГЭУ)

## **Моделирование прогрева плоской пластины перемещающимся локальным источником тепла при фазовых переходах на ее поверхности**

В ряде технологических процессов строительной и других отраслей промышленности одной из технологических операций является прогрев пластины локальным высокотемпературным источником тепла, например, газовой горелкой. В частности, такая технология используется при расплаве стеклянной крошки на поверхности бетонных изделий для формирования защитных и декоративных покрытий. Поскольку с не обогреваемых участков поверхности происходит непрерывная теплоотдача в окружающую среду, нагрев пластины и плавление наносимого материала оказываются неравномерными, причем степень неравномерности зависит от того, по какому закону источник тепла перемещается по поверхности пластины. Эмпирический подбор рациональной программы движения источника является трудоемкой задачей, осложняющейся тем, что требования к формируемому полю температуры различны в различных технологиях.

Для математического моделирования указанного процесса предложено использовать двухмерную ячейчатую модель плоской пластины, описывающую теплопроводность внутри нее. Собственно модель теплопроводности построена для теплоизолированной по контуру пластины и базируется на переходной матрице, соответствующей матрице переходных вероятностей для двухмерной цепи Маркова. Теплоотдача от локального источника теплоты и теплоотдача в окружающую среду описана через функции источников или стоков теплоты в соответствующих ячейках. При прогреве ячейки до температуры фазового перехода (плавления) в ячейку вводится дополнительный отрицательный источник теплоты, обусловленный теплотой фазового перехода (при затвердевании эта теплота выделяется, то есть источник имеет положительный знак). При полном плавлении материала в ячейке происходит ее дальнейший прогрев, но уже в жидкой фазе. Положение ячейки, к которой подводится тепло от высокотемпературного источника, может меняться от перехода к переходу. Построенная таким образом матричная эволюционная модель прогрева при наличии фазовых переходов позволяет описывать формирование поля температуры и концентрации расплава при любой задаваемой программе движения источника тепла по поверхности пластины, включая «ручное» управление с помощью мыши. На основе разработанной модели были выполнены численные эксперименты, позволившие исследовать эволюцию температуры и концентрации расплава, а также выявить рациональные программы движения источника по различным целевым функциям.

## Ячеечная модель тепломассопереноса через плоскую стенку при наличии фазовых переходов

Современное состояние развития народного хозяйства характеризуется все возрастающей ролью задач энергосбережения. В строительной и смежных отраслях промышленности одним из основных направлений решения этой задачи является адекватный учет и прогнозирование тепловлажностного режима ограждающих строительных конструкций при их производстве и эксплуатации. Характерной особенностью этого режима является то, что как при производстве, так и при эксплуатации в составе строительных сооружений параметры окружающей среды не являются постоянными во времени. В сочетании с тем, что теплофизические свойства материалов, из которых выполнены стеновые конструкции, сами в значительной степени зависят от температуры и влажности материала, которые не одинаковы в разных точках стены, а при переходном процессе и во времени, эти обстоятельства делают задачу прогнозирования переменного тепловлажностного режима стены очень сложной, а ее более или менее детальное экспериментальное исследование практически не реальным из-за большого числа параметров задачи.

Для построения ячейечной математической модели стеновая конструкция делилась на одинаковые слои толщины  $\Delta x = L/m$  ( $L$  – толщина стенки,  $m$  – количество ячеек). Кинетика процесса основывается на матричных равенствах:  $\mathbf{T}^{i+1} = \mathbf{P}_T \mathbf{T}^i$ ,  $\mathbf{e}^{i+1} = \mathbf{P}_V \mathbf{e}^i$ , где  $\mathbf{P}_T$  и  $\mathbf{P}_V$  – матрицы переходных вероятностей для температуры и массопереноса, изменяющиеся на каждом временном интервале;  $\mathbf{T}^i$  и  $\mathbf{e}^i$  – векторы состояния для температуры и массопереноса соответственно. Основными параметрами модели являются элементы матрицы переходных вероятностей, описывающие тепломассоперенос между ячейками цепи и рассчитываемые по известным теплофизическим свойствам материалов, из которых изготовлена стеновая конструкция, ее длине  $L$ , а так же по шагу временной дискретизации процесса  $\Delta t$ . Внешний тепло- и массообмен задаются через функции источников (стоков) для периферийных ячеек.

Построенная таким образом матричная эволюционная модель тепломассопереноса при наличии фазовых переходов позволяет описывать процессы, происходящие в стеновых конструкциях при постоянно изменяющихся условиях окружающей среды. Для реализации модели разработан универсальный алгоритм и программное обеспечение. Численные эксперименты, выполненные по разработанной модели, показали удовлетворительные результаты.

УДК 621.928

А.В. ОГУРЦОВ, к.т.н., доц., В.А. ОГУРЦОВ, к.т.н., доц., А.В. МИТРОФАНОВ, студ.  
(ИГЭУ)

## **Моделирование поля концентраций частиц в цилиндрическом аппарате кипящего слоя на основе теории цепей Маркова**

Поскольку процессы псевдооживления до настоящего времени не поддаются точному расчету и их промышленная организация сопряжена с большим количеством экспериментов на лабораторных и полупромышленных установках, нами предложена ячеечная модель, описывающая поведение частиц в восходящем потоке газа, с учётом изменяющейся скорости обтекания частиц.

В линейных моделях считается, что скорость газа не зависит ни от наличия в аппарате материала, ни от его распределения по высоте аппарата. В реальных условиях материал загромождает сечение аппарата, в результате чего скорость газа увеличивается, что, в свою очередь, изменяет концентрацию материала, то есть процесс, очевидно, является нелинейным.

Аппарат с взвешенным слоем разбит по длине на  $n$  ячеек длиной  $\Delta x$ . Движение материала рассматривается через малые конечные промежутки времени  $\Delta t$ , в течение которых частицы могут переместиться не далее соседней ячейки. Текущее состояние процесса представлено вектором-столбцом, состоящим из масс материала в каждой ячейке. Эволюция состояния получается путем умножения матрицы переходных вероятностей на вектор состояния.

Матрица переходных вероятностей — трехдиагональная матрица размером  $n \times n$ , в каждом столбце которой размещены вероятности для материала в данной ячейке перейти назад, остаться и перейти вперед. Вероятности остаться в текущей ячейке составляют главную диагональ этой матрицы, вероятности перехода назад и перехода вперед располагаются соответственно на диагоналях над и под главной. Вероятности переходов пропорциональны скорости движения частиц, которая в свою очередь зависит от концентрации материала в данной ячейке, что обуславливает нелинейность зависимости концентрации частиц от их скорости.

Таким образом, предложенная нелинейная модель, позволяющая получить распределения концентраций и скоростей частиц по высоте аппарата в установившемся режиме. С помощью модели может быть исследован и переходный режим, а также уточнено значение скорости начала псевдооживления и критической скорости уноса материала из аппарата.

УДК 621.321

Е.В. МАГДИЕВ, асп., В.П. ЖУКОВ, д.т.н., проф., Е.В. БАРОЧКИН, к.т.н., доц. (ИГЭУ)

## Применение теории цепей Маркова к моделированию переходных процессов в теплообменных аппаратах

Математические модели переходных процессов теплоэнергетического оборудования позволяют создавать и эффективно эксплуатировать как системы автоматического регулирования, так и многофункциональные тренажеры. На основе теории цепей Маркова предложена модель прямо-точного кожухотрубного теплообменника.

Разобьем теплообменник по длине на  $n$  элементов. Рассмотрим процесс теплообмена без учета фазового перехода в теплоносителях. Введем вектор состояния системы, составленный из температур горячего  $t_1$  и холодного  $t_2$  теплоносителей  $T = [t_{11} \ t_{21} \ t_{12} \ t_{22} \ \dots \ t_{1n} \ t_{2n}]$ , где первый индекс характеризует теплоноситель: «1» – горячий, «2» – холодный, второй индекс соответствует номеру ячейки. Параметры среды внутри ячейки имеют постоянное значение.

Для построения матрицы переходных вероятностей рассмотрим тепловые балансы для ячейки горячего и холодного теплоносителей (рис. 1). Изменение энергии в ячейке происходит за счет внутренних и внешних потоков теплоносителей и теплопередачи от горячего теплоносителя холодному. Тепловую энергию среды в ячейке представим как произведение массы  $G$ , теплоемкости  $c$  и температуры теплоносителя в виде  $G_1 c_1 t_{1i}^j$ , где верхний индекс

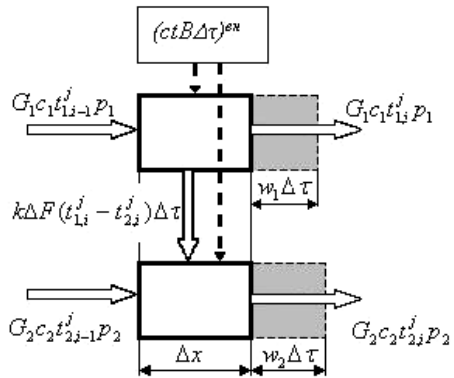


Рис. 1. Расчетная схема энергетических балансов теплоносителей для  $i$ -й ячейки

показывает номер шага по времени. Считаем, что режим движения теплоносителя соответствует идеальному вытеснению, размеры канала, расход и скорость движения не меняются вдоль аппарата, но различаются для горячего и холодного теплоносителей. В следующую  $i+1$  ячейку переходит количество энергии, определяемое произведением  $G_1 c_1 t_{1i}^j p_1$ , где  $p_1$  – доля теплоносителя, покидающего ячейку за время  $\Delta t$ . Энергия, приходящая с теплоносителем из предыдущей  $i-1$  ячейки

ки, равна  $G_1 c_1 t_{1i-1}^j p_1$ . За счет внешних потоков энергия изменяется на величину  $c_1 t_{1i}^{BH} B_1^{BH} \Delta\tau$ , за счет теплопередачи уменьшение тепловой энергии горячего теплоносителя составит  $k\Delta F(t_{1i}^j - t_{2i}^j)\Delta\tau$ , где  $B$  – массовая производительность. Баланс энергии для ячейки горячего теплоносителя записывается в виде:

$$G_1 c_1 t_{1i}^{j+1} = G_1 c_1 t_{1i}^j + G_1 c_1 t_{1i-1}^j p_1 - G_1 c_1 t_{1i}^j p_1 - k\Delta F(t_{1i}^j - t_{2i}^j)\Delta\tau + B_{1i}^{BH} c_1 t_{1i}^{BH} \Delta\tau.$$

Считая заполнение ячеек по длине реактора одинаковым, а теплоемкость постоянной, найдем температуру в ячейке в  $(j+1)$  момент времени

$$t_{1i}^{j+1} = (1 - p_1 - a_1) t_{1i}^j + p_1 t_{1i-1}^j + a_1 t_{2i}^j + p_{1i}^{BH} t_{1i}^{BH},$$

где

$$a_1 = \frac{k\Delta F\Delta\tau}{G_1 c_1}; \quad p_1 = \frac{w_1 \Delta\tau}{\Delta x}; \quad p_{1i}^{BH} = \frac{B_{1i}^{BH} \Delta\tau}{G_1}.$$

Полученные выражения, записанные для всех ячеек аппарата для холодного и горячего теплоносителя, представим в матричном виде:

$$\mathbf{T}^{j+1} = \mathbf{PT}^j + \mathbf{TP}, \quad (1)$$

где блочная матрица переходных вероятностей  $\mathbf{P}$  для одинаковых ячеек составляется из одинаковых блоков в виде:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_a & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_t & P_a & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P_t & P_a \end{pmatrix}, \quad P_a = \begin{pmatrix} 1 - p_1 - a_1 & a_1 \\ a_2 & 1 - p_2 - a_2 \end{pmatrix},$$

$$P_t = \begin{pmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{pmatrix}, \quad O = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{TP} = \begin{pmatrix} p_{11}^{BH} t_{11}^{BH} \\ p_{21}^{BH} t_{21}^{BH} \\ \dots \\ p_{1n}^{BH} t_{1n}^{BH} \\ p_{2n}^{BH} t_{2n}^{BH} \end{pmatrix}.$$

Матрица  $\mathbf{P}_a$  учитывает переход тепловой энергии от горячего теплоносителя к холодному. Матрица  $\mathbf{P}_t$  составляется из вероятностей физических переходов теплоносителей из ячейки в ячейку. Матрица  $\mathbf{TP}$  характеризует внешние для аппарата потоки, которые могут подаваться в любые ячейки.

С помощью матричного уравнения (1) определяются распределения температуры теплоносителей вдоль канала в произвольный момент времени.

Произведен расчет переходного процесса для прямоточного кожухотрубного подогревателя. Теплообменник по длине условно разделен на 5 участков, холодному и горячему теплоносителю на каждом элементе длины соответствует своя ячейка. Эволюция распределения температур вдоль аппарата после резкого изменения температуры горячего теплоносителя на входе в аппарат показана на рис. 2. Тонкие линии соответствуют распределениям температур вдоль канала в разные моменты времени, толстые линии – асимптотическим распределениям температур. Направления изменения распределений температур во времени показаны стрелками.

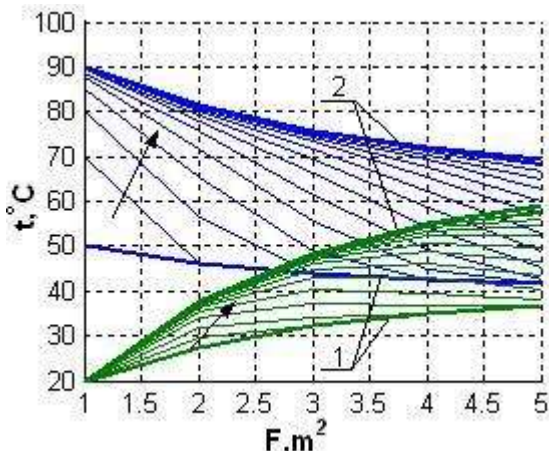


Рис. 2. Распределение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности нагрева в разные моменты времени (1 – исходные, 2 – конечные асимптотические распределения температур)

Рассмотренный подход целесообразно использовать при построении многофункциональных тренажеров теплосилового оборудования и проектировании автоматических регуляторов тепломеханических процессов в химической и смежных отраслях промышленности.

#### Литература

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969.
2. Барочкин Е.В. и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – № 2. – С.45-47.



УДК 621.321

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, асп., Е.В. БАРОЧКИН, к.т.н., доц.,  
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., проф., В.Н. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ)

## Расчетно-экспериментальные исследования процессов теплообмена в условиях струйно-барботажной деаэрации воды

Основную долю дегазационных аппаратов, применяемых на действующих и проектируемых энергообъектах России, составляют термические деаэраторы струйно-барботажного типа. Существующие методы расчета деаэраторов не позволяют с требуемой адекватностью описывать как реализуемые в них технологические процессы, так и последствия конструктивных изменений, предлагаемых в ходе реконструкций и модернизаций аппаратов. Отсутствие методик, обеспечивающих требуемую точность расчета, приводит к значительному увеличению продолжительности и объема режимно-наладочных испытаний деаэрационных установок.

Таким образом, разработка математических моделей, алгоритмов и инженерных методик расчета термических деаэраторов струйно-барботажного типа, проведение экспериментальных и расчетных исследований режимов их работы являются актуальными задачами энергетики.

В докладе предложена математическая модель процесса теплообмена в системе «вода-пар», разработанная на основе матричной формализации расчета сложных тепло- и массообменных установок [1]. В основу математического описания положены уравнения материального и энергетического баланса. Установка разбита на  $n$  ступеней, каждая из которых представлена четырехполюсником с входными и выходными потоками для холодного и горячего теплоносителей. Входной вектор признаков для  $i$ -го элемента представлен как сумма аддитивных характеристик смешиваемых на входе в него потоков. Аналогичные уравнения для каждой ступени установки и записываются в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \vdots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{вх}]_1 \\ -[X_{вх}]_2 \\ \vdots \\ -[X_{вх}]_n \end{pmatrix},$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток,  $[X_0]_j$  – вектор признаков потоков холодного и горячего теплоносителя на входе в  $j$ -й элемент,  $B_j$  – матрица процесса теплообмена, протекающего в  $j$ -м элементе,  $K_{ij}$  – матрица коммутации, элементы которой показывают доли потока из  $j$ -й ступени в  $i$ -ю,  $I$  – единичная матрица.

Ранее нами показано [1], что процесс деаэрации связан с незначительными массо- и энергопотоками, поэтому процессы теплообмена и деаэрации рассматриваются последовательно. На первом этапе решается задача определения температуры и расхода теплоносителей. В качестве определяющих параметров выбраны степень сухости пара и температура воды. Вектор параметров на втором этапе решения задачи составляется из концентрации газа в паровой фазе и воде. Движущей силой газообмена является разность между текущей и равновесной концентрацией газа.

Учет химических взаимодействий (например, процессов разложения бикарбонатов при моделировании газообмена с участием углекислоты) значительно усложняет модели, однако хорошо интегрируется в разработанный метод описания теплообмена.

Математическая модель идентифицирована по результатам натурных испытаний деаэратора ДСА-300. В ходе проведения экспериментальных исследований контролировались теплотехнические и химические параметры, характеризующие состояние рабочих сред входных и выходных потоков, а также внутренних элементов деаэратора. Деаэратор оборудован линиями для отбора проб: химически очищенной воды на входе в деаэрационную колонку; воды с внешней стороны нижней распределительной тарелки деаэрационной колонки; воды с внутренней стороны нижней распределительной тарелки деаэрационной колонки; воды с выхода струйной ступени деаэрационной колонки; воды из середины деаэраторного бака, оборудованного затопленным барботажным коллектором; воды с выхода деаэраторного бака; пара, подаваемого в деаэратор; выпара деаэратора.

Проведена статистическая обработка результатов прямых и косвенных измерений, рассчитаны доверительные интервалы для всех контролируемых параметров, показатели точности (правильности и прецизионности) измерений.

В ряде режимов выявлена неэффективная работа первого отсека струйной ступени деаэрационной колонки, где деаэрируемая вода насыщается кислородом и свободной углекислотой. При этом концентрация последней превышает её концентрацию в химически очищенной воде на входе в деаэратор. Показано влияние качества греющего пара на процесс деаэрации.

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.

### Литература

**1. Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ледуховский Г.В.** Моделирование тепломассообмена в смешивающих подогревателях со сложной конфигурацией потоков // Известия ВУЗов: химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – Вып. 4. – С. 164-166.

## **К вопросу о применении стандартизованных методов статистической обработки данных теплотехнического и теплотехнического эксперимента**

Идентификация математической модели некоторого объекта проводится по результатам экспериментальных исследований. Данные эксперимента обычно представляют собой совокупности значений контролируемых 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 математических методов обработки данных [1]. Выбор метода обработки определяется задачами исследования и направлениями дальнейшего использования получаемых результатов. Однако главным требованием в отношении этих результатов является их представительность. Представительность результатов исследований, в числе прочего, обеспечивается использованием стандартизованных методов обработки экспериментальных данных.

В России действует ряд нормативных документов, регламентирующих процедуры обработки результатов испытаний и способы представления полученных данных. Основная информация, имеющая отношение к рассматриваемым задачам, содержится в государственных стандартах, рекомендациях и методических указаниях [2-16].

Если нет специальных требований, в ходе обработки результатов измерений должны быть определены следующие характеристики: окончательные результаты измерений и доверительные границы их погрешности, показатели точности (правильности и прецизионности) результатов измерений.

С введением в действие нормативных документов [2, 6-16] не отменяется действие других государственных стандартов и нормативных документов, регламентирующих процедуры обработки экспериментальных данных, таких как [3-5]. Вместе с тем, между документами [2, 6-16] и [3-5] имеется ряд различий, в том числе, терминологических. Использование основных положений и терминологии нормативных документов [2, 6-16] является предпочтительным, что обусловлено следующими причинами: во-первых, выдвигаемые документами [2, 6-16] требования не противоречат соответствующим требованиям ранее изданных нор-

мативных документов [3-5], а лишь дополняют их; во-вторых, в [2, 6-16] используется терминология международных стандартов, в частности основополагающего стандарта ИСО 5725:1994, стандарты и нормативные документы [3-5] являются государственными стандартами Российской Федерации.

Стандарты и нормативные документы [3-5] следует использовать в тех случаях, когда поставленные задачи не могут быть решены с использованием нормативных документов [2, 6-16]. Приведем один из представленных в докладе примеров.

Процедуру обработки экспериментальных данных, получаемых как совокупность результатов многократных независимых прямых измерений, описывает государственный стандарт [3]. В соответствии с п. 1.1 указанного стандарта при статистической обработке группы результатов наблюдений следует выполнять следующие операции: отсеять грубые промахи; исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений; вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений; вычислить оценки средних квадратических отклонений результатов наблюдений и результата измерения; проверить гипотезу о принадлежности результатов наблюдений нормальному распределению; вычислить доверительные границы случайной и неисключенной систематической составляющих погрешности результата измерения; вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Замечания.

1. Нормативные документы [2, 6-16] оперируют термином «результат измерения» вместо термина «наблюдение», который используется в [3], термином «окончательный результат измерения», аналогичным применяемому в [3] термину «результат измерения», термином «стандартное отклонение» вместо термина «среднее квадратическое отклонение».

2. В качестве окончательного результата измерения стандартом [3] предписано принимать среднее арифметическое результатов всех измерений, что противоречит требованиям стандарта [16], где процедура получения окончательного результата значительно расширена.

3. Стандарт [3] может применяться только в том случае, если распределение результатов измерений является нормальным. Стандарты [11-16] указывают на достаточность унимодальности распределения.

4. Представление результатов измерений может быть неоднозначным. В частности, нормативные документы [3-5] используют понятие доверительных границ погрешности результата измерения, а международные стандарты – неопределенности измерений. Связь между альтернативными способами представления результатов показана в [6].

Показатели точности результатов измерений определяются с учетом требований государственного стандарта ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (в 6 частях) [11-16] и рекомендаций РГМ 61-2003 [9].

Стандарт [11] устанавливает две основных характеристики точности, определяемые в ходе обработки результатов измерений: правильность и прецизионность. При этом под правильностью результата изме-

рения понимается степень близости результата измерений к истинному или условно истинному (действительному) значению измеряемой величины или в случае отсутствия эталона измеряемой величины – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений (или результатов испытаний) к принятому опорному значению. Понятие «принятое опорное значение» требует особого внимания. Согласно [11], в качестве него может быть принято математическое ожидание измеряемой характеристики (среднее значение заданной совокупности результатов измерений), но лишь при условии, если его невозможно определить иными регламентированными способами (как теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах; приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации; согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы).

Под прецизионностью результатов измерения понимается степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Крайние случаи совокупностей регламентированных условий (например, таких как оператор, используемые средства и методы измерений, калибровка оборудования, параметры окружающей среды, интервалы времени между последовательными измерениями и пр.) составляют условия повторяемости (неизменными остаются все перечисленные факторы, кроме интервалов времени) и условия воспроизводимости (все факторы могут проявлять изменчивость).

В большинстве случаев существует возможность определения только промежуточных показателей прецизионности, назначение которых состоит в том, чтобы оценить способность метода измерений к повторению результатов измерений в точно определенных условиях. Результаты измерений следует признать приемлемыми в том случае, если стандартное отклонение в промежуточных условиях прецизионности не превышает стандартного отклонения в условиях воспроизводимости.

В докладе отражены основные положения, которые следует учитывать при разработке алгоритмов обработки экспериментальных данных на основе стандартизованных методов, а также некоторые особенности организации эксперимента с точки зрения последующей обработки его результатов. Приведены примеры использования альтернативных стандартизованных методов.

## Литература

**1. Теплоэнергетика** и теплотехника: Общие вопросы: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ, 1999 – 564 с. (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2).

- 2. Р 50.2.038-2004.** Рекомендации по метрологии. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результатов измерений.
- 3. ГОСТ 8.207-76.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
- 4. МИ 2083-90.** Измерения косвенные. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
- 5. МИ 1317-86.** Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
- 6. РГМ 43-2001.** Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
- 7. МИ 2881-2004.** Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики количественного химического анализа. Процедуры проверки приемлемости результатов анализа.
- 8. МИ 2336-2002.** Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.
- 9. РГМ 61-2003.** Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.
- 10. МИ 2335-2003.** Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа.
- 11. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
- 12. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.
- 13. ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений.
- 14. ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений.
- 15. ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений.
- 16. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике.

## Температурное поле пористой пластины при лучистом нагреве и фильтрации теплоносителя

Лучистый нагрев пористого материала, сопровождающийся фильтрацией теплоносителя, довольно часто встречается в инженерной практике. Этот процесс протекает, например, в пористых ограждениях ВТУ, при термообработке текстильных изделий, садов метизов и шихтовых материалов [1-3]. В роли теплоносителя выступают продукты горения, воздух, пар, пиролизные газы и т.д.

Существуют разные подходы моделирования теплообмена в пористых телах. Так теплообмен в телах, состоящих из термически массивных частиц ( $Bi > 0,5$ ), описывается следующей системой уравнений:

$$C_M(T_M) \frac{\partial T}{\partial \tau} = x^{-\kappa} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) x^\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$C_G(T_G) \frac{\partial T_G}{\partial \tau} - W_G(\tau) C_G(T_G) \frac{\partial T_G}{\partial y} = \alpha(T_G - T_M) \omega, \quad (2)$$

где  $\kappa$  – фактор формы,  $x, y$  – координаты по толщине и высоте слоя,  $\omega$  [ $M^2 / M^3$ ] – поверхность материала в единице объема слоя.

Описание теплообмена в телах из термически тонких частиц ( $Bi \leq 1/4$ ) проводится двумя способами:

$$1) \alpha = \infty, \text{ т.е. } T_G = T_M, \quad [C_M \cdot (1-f) + C_G \cdot f] \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -W_G \cdot f \cdot C_G \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_G \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2};$$

2)  $\alpha$  равно конкретному (конечному) количественному значению, а уравнение ТМО записывается отдельно для материала и газа.

Что касается краевых условий нагрева, то они являются классическими. Например, в [1] и [2] используются граничные условия 1, 2 и 3 рода. Правда авторы не раскрыли, как следует рассчитать коэффициенты теплоотдачи и как на практике реализовать «модельные» граничные условия при наличии фильтрации теплоносителя.

Следует отметить и то, что эффективные теплофизические свойства ( $s$  и  $\lambda$ ) пористого тела рекомендуется определять «из экспериментальной их зависимости от температуры для данной марки стали», т.е. приравнять свойства сплошного и пористого тела.

С нашей точки зрения, полученные таким образом значения ТФС, следует рассматривать как оценочные, а для более точного их определения использовать подход [3]. Более того, не следует применять в расчетах кусочно-линейную аппроксимацию  $s(t)$ , т.к. это приводит к скачкообразному изменению теплоёмкости при температуре  $t_{c,a}$ , т.е. нарушению

непрерывности функции (рис. 1). Не знание этой особенности может привести пользователя программы к ошибочным выводам.

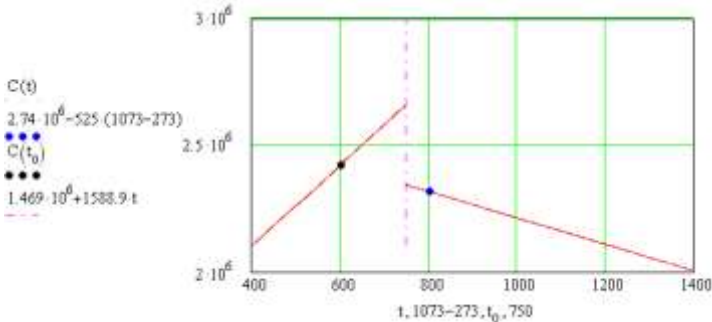


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация зависимости теплоемкости стали от температуры

Опыт использования [1] и [2] в учебной и исследовательской работе показал необходимость корректировки моделей с целью расширения области их применения.

В качестве 1-го шага в этом направлении была поставлена и решена задача лучистого нагрева пористой пластины сопровождаемого фильтрацией теплоносителя.

Предлагаемая математическая модель температурного поля пористой пластины при лучистом нагреве и фильтрации теплоносителя включает

- уравнение теплопроводности ( $X \in (0, 1)$  и  $Fo > 0$ )

$$\frac{\partial}{\partial Fo} \theta(X, Fo) = \frac{\partial^2}{\partial X^2} \theta(X, Fo) - A \cdot \frac{\partial}{\partial X} \theta(X, Fo) + B \cdot \exp(-Bu \cdot X) \quad (1)$$

- начальные условия ( $X \in [0, 1]$ )

$$\theta(X, Fo)|_{Fo=0} = 1 \quad (2)$$

- условия теплообмена на границе  $X = 0$

$$\frac{\partial}{\partial X} \theta(X, Fo) \Big|_{X=0} = (Bi_1 + A) \cdot [\theta(0, Fo) - \theta_1], \quad Fo > 0, \quad (3)$$

- условия теплообмена на границе  $X = 1$

$$\frac{\partial}{\partial X} \theta(X, Fo) \Big|_{X=1} = Bi_2 \cdot [\theta_2 - \theta(1, Fo)], \quad Fo > 0. \quad (4)$$

Здесь

$$Bi_1 = \alpha_1 \cdot R / \lambda, \quad Bi_2 = \alpha_2 \cdot R / \lambda, \quad \theta_1 = t_1 / t_o, \quad \theta_2 = t_2 / t_o, \quad X = x / R, \quad (5)$$

$$Fo = a \cdot \tau / R^2, \quad Bu = k \cdot R, \quad A = \frac{R \cdot W_g \cdot c_g}{a \cdot c}, \quad B = \frac{Bu \cdot R \cdot q_o}{a \cdot c \cdot t_o}$$

безразмерные комплексы и симплексы.



Решение задачи (1) – (4) имеет вид

$$\theta(X, Fo) = 1 - \frac{B}{D} \cdot e^{-Bu \cdot X} \cdot \left\{ \frac{f_1 - f_2}{f_3} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_4 - f_5}{f_6} \cdot e^{-(\mu_n^2 + A^2/4)Fo} \right\} \cdot e^{A \cdot X/2} \quad (6)$$

где

$$D = A \cdot Bu + Bu^2, \quad G = \mu_n^2 + (Bu + A/2)^2, \quad H_1 = Bi_1 + A/2, \quad (7)$$

$$H_2 = Bi_2 + A/2, \quad N_{11} = (1 - \theta_1) \cdot (H_1 + A/2), \quad N_{12} = B \cdot (H_1 + Bu + A/2), \quad (8)$$

$$N_{21} = (\theta_2 - 1) \cdot Bi_2 \cdot e^{-A/2}, \quad N_{22} = -B \cdot Bi_2 \cdot e^{-(Bu + A/2)}, \quad P = \mu_n^2 + A^2/4, \quad (9)$$

$$f_1 = [N_{22} - N_{21} \cdot D] \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot ch(A \cdot X/2) + H_1 \cdot sh(A \cdot X/2) \right], \quad (10)$$

$$f_2 = [N_{12} - N_{11} \cdot D] \cdot \left[ \frac{A}{2} \cdot ch\left(\frac{A}{2} \cdot (1 - X)\right) + H_2 \cdot sh\left(\frac{A}{2} \cdot (1 - X)\right) \right] \quad (11)$$

$$f_3 = D \cdot \left[ (H_1 + H_2) \cdot \frac{A}{2} \cdot ch(A/2) + (A^2/4 + H_1 \cdot H_2) \cdot sh(A/2) \right], \quad (12)$$

$$f_4 = (N_{22} - N_{21} \cdot G) \cdot \left[ \mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n \cdot X) + H_1 \cdot \mu_n \cdot \sin(\mu_n \cdot X) \right] \quad (13)$$

$$f_5 = (N_{12} - N_{11} \cdot G) \cdot \left[ \mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n \cdot (1 - X)) + H_2 \cdot \mu_n \cdot \sin(\mu_n \cdot (1 - X)) \right] \quad (14)$$

$$f_6 = P \cdot G \cdot \left[ (H_1 + H_2 + H_1 \cdot H_2 - \mu_n^2) \cdot ch(\mu_n) - (2 + H_1 + H_2) \cdot \mu_n \cdot sh(\mu_n) \right] \quad (15)$$

$\mu_n$  - корни характеристического уравнения

$$(H_1 + H_2) \cdot \mu \cdot \cos(\mu) = (\mu^2 - H_1 \cdot H_2) \cdot \sin(\mu) \quad (16)$$

Графическая иллюстрация решения (6) представлена на рис. 2

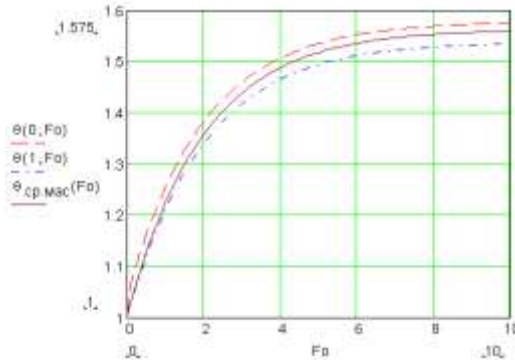


Рис. 2. Температурное поле пористой пластины при её лучистом нагреве и фильтрации теплоносителя

Расчет температурного поля проведен при следующих значениях

$$Bi_1 = 0, Bi_2 = 0, A = 0.26, \theta_1 = 473/293, Bu = 0.67, B = 0.067 \quad (17)$$

Второй шаг в направлении совершенствования указанных моделей состоял в установлении критериев, определяющих доминирующий механизм переноса в пористой пластине.

В условиях нагрева пористого тела, когда процессом теплопроводности можно пренебречь по сравнению с процессами фильтрации и излучения температурное поле описывается уравнением:

$$C \cdot \partial t / \partial \tau = k \cdot q_0 \cdot e^{-kx} \pm W_g \cdot C_g \cdot \partial t / \partial x \quad (18)$$

где  $q_0 = q_{nao} \cdot (1-r)$  – поток излучения прошедший через фронтальную поверхность пористого тела, имеющего коэффициенты отражения  $r$  и поглощения  $k$ . Знак « $\pm$ » означает, что при совпадении направления фильтрации и излучения следует использовать знак « $-$ », иначе – « $+$ ».

Можно показать, что использование уравнения (18) допустимо при выполнении условий:

$$\xi_1 = \frac{a \cdot k}{\beta \cdot W_g} \cdot (e^{k \cdot W_g \cdot \beta \cdot \tau} - 1) \ll 1, \quad \beta = c_g / c, \quad (19)$$

$$\xi_2 = |a \cdot \tau \cdot k^2 - W_g \cdot \beta \cdot k \cdot \tau| \ll 1 \quad (20)$$

При этом погрешность использования уравнения (18) можно оценить по величине  $\delta_M = \xi / (1 + \xi)$ .

Условие (19) относится к случаю совпадения направления фильтрации и излучения, а условие (20) соответствует случаю противоположных (встречных) направлений переноса теплоты излучением и жидким или газообразным теплоносителем. Если указанные условия выполняются с точностью наоборот, то доминирующим механизмом переноса теплоты является теплопроводность.

Таким образом, по величине  $\xi$  или  $\delta_M$  можно судить о вкладе каждого из механизмов переноса теплоты в общий процесс и, следовательно, выбрать то сочетание механизмов переноса, которое более всего подходит к описанию исследуемого процесса.

### Литература

- 1. Бровкин Л.А., Гузов Л.А.** Математическая модель температурного поля пористой пластины с фильтрацией теплоносителя // Математическое и физическое моделирование процессов в теплотехнологических установках: Межвуз. сб. научн. тр. / Иван. гос. ун-т, Иван. энерг. ин-т. – Иваново: ИвГУ, 1985. – С.20-28.
- 2. Крылова Л.С.** Расчет температурного поля пористой пластины с фильтрацией теплоносителя. Методические указания к программе «ol1». – Иваново: ИГЭУ, 1999. – 28 с.
- 3. Крылова О.Б., Становой В.И., Буйлов А.А., Пуговкин А.У.** К определению теплофизических свойств насыпной металлической садки // Математическое и физическое моделирование процессов в теплотехнических установках: Межвуз. сб. научн. тр. / Иван. гос. ун-т, Иван. энерг. ин-т. – Иваново: ИвГУ, 1986. – С.76-80.

## Математическое моделирование процесса грохочения

Грохочением называется процесс разделения сыпучих материалов на просеивающих поверхностях с калиброванными отверстиями. Принципиальная конструкция грохота представлена на рис. 1.

Исходный материал ( $Q$ ) подаётся на сито (колосниковую решетку), где разделяется на два продукта – надрешеточный ( $S$ ) и подрешеточный ( $P$ ). Уравнение материального баланса исходного материала можно представить в виде:

$$Q = S + P \quad (1)$$

или

$$Q = G_m + G_k \quad (2)$$

где  $G_m$  – массовый расход мелкого ( $d_i < d_{\text{сита}}$ ) класса кг/с;  $G_k$  – масса крупного класса в единицу времени, кг/с.

Основная задача моделирования грохота заключается в определении гранулометрических составов и расходов надрешеточного и подрешеточного продуктов. Процессы формирования дисперсных составов данных потоков обладают существенными отличиями. Так, например, сквозь сито колосниковой решетки пройдёт не весь мелкий класс, а лишь его часть –  $\beta$ . Следовательно, в надрешеточный продукт перейдёт  $(1-\beta)$  массы мелкого класса. Объясняется это явление наличием трудных зёрен, недостаточным временем просева, стохастическим характером процесса классификации и прочими причинами.

С учётом вышеизложенного, расход подрешеточного продукта составит:

$$P = G_m \cdot \beta. \quad (3)$$

Расход надрешеточного продукта соответственно равен:

$$S = G_k + G_m \cdot (1 - \beta). \quad (4)$$

Для определения величины  $\beta$  необходимо ввести величину отражающую эффективность извлечения мелкого класса в подрешеточный продукт. Для определения данной величины нами предлагается использовать следующее выражение:



Рис. 1 Принципиальная схема односитного грохота

$$\begin{cases} E(d_i) = \frac{1}{e \left(\frac{d_i}{p}\right)^m} & \text{при } d_i < d_{\text{сита}} \\ E(d_i) = 0 & \text{при } d_i \geq d_{\text{сита}} \end{cases} \quad (5)$$

где  $p, m$  – параметры идентификации классификатора.

На рис. 2 показано графическое выражение предложенной зависимости (5) при различных соотношениях численных значений параметров  $p$  и  $m$ .

Плотность распределения подрешеточного продукта рассчитывается:

$$f(d)_m = \frac{G_{im}}{\sum_{d_i=0}^{d=dsita} G_{im}} \quad (6)$$

где  $G_{im} = G_i \cdot E(d_i)$ ,

$G_i$  – масса  $i$ -го класса.

Очевидно, что должно выполняться условие:

$$G_m \cdot \beta = \sum_{d_i=0}^{d=dsita} G_{im} \quad (7)$$

Из формулы (7) определяется массовая доля мелких классов –  $\beta$ , прошедших сквозь сито грохота.

Суммарная масса надрешеточного продукта составляет:

$$S = \sum_{d=0}^{dsita} G_{ikm} + \sum_{dsita}^{dmax} G_{ki} \quad (8)$$

где  $G_{ikm} = G_i - G_{im}$ ,  $G_{ki} = f(d) \cdot Q$ .

Гранулометрический состав надрешеточного продукта рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} f(\delta)_k &= \frac{G_{ikm}}{S}, & \text{при } d_i < dsita \\ f(\delta)_k &= \frac{G_{ki}}{S}, & \text{при } d_i \geq dsita \end{aligned} \quad (10)$$

Система уравнений (1)–(10) представляет математическую модель односитного грохота, обладающую двумя эмпирически определяемыми параметрами.

### Литература

1. Макаров В.И., Соколов В.П. Машины для дробления и сортировки материалов. Справочник. – М. - Л., 1966.
2. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых, 2 изд. – М., 1966.

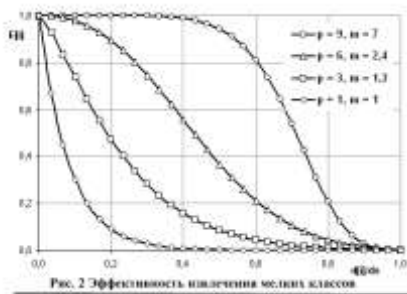


Рис. 2 Эффективность извлечения мелких классов

УДК 621.926

В.П. ЖУКОВ, д.т.н., проф., С.Ф. СМИРНОВ, к.т.н., доц., А.Г. КРАСИЛЬНИКОВ, асп.  
(ИГЭУ, ИГАСУ)

## Селективная функция измельчения в измельчителях с распределенной мелющей средой

Популяционно-балансовая модель описывает эволюцию гранулометрического состава продуктов измельчения с помощью функций разрушения: селективной и распределительной. Определение селективной функции измельчения для шаровых барабанных мельниц выполнено нами ранее [1]. В докладе предлагается метод расчета селективной функции и его экспериментальная проверка для вибрационных мельниц с полифракционной мелющей загрузкой.

Селективная функция измельчения  $S(\delta)$  или скорость измельчения фракции показывает убыль доли фракции за единицу времени и записывается в виде произведения вероятности нагружения частицы  $\psi_1(\delta)$  на вероятность разрушения нагруженной частицы  $\psi_2(\delta)$

$$S(\delta) = \psi_1(\delta) \cdot \psi_2(\delta) \quad (1)$$

Считается, что энергообмен в вибромельнице между мелющей загрузкой и измельчаемым материалом происходит через некоторую поверхность  $F$ . Площадь энергообмена, приходящаяся на фракцию, пропорциональна массовой доле этой фракции в загрузке. Вероятность нагружения частицы вычисляется через отношение числа нагруженных частиц к общему числу частиц данной фракции в загрузке. Отношение общего энергопотока  $E$  к поверхности энергообмена  $F$  определяет плотность энергоподвода, произведение которой на поверхность нагруженной частицы позволяет вычислить энергию, подведенную к частице  $e_1 = e(\delta)$ . Считается [1], что зависимость вероятности разрушения частицы от энергоподвода к этой частице подчиняется нормальному закону

$$\psi_2(\delta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^U \exp(-t^2/2) \cdot dt + 0,5, \quad (2)$$

где  $U = (e_1 - \langle e \rangle) / \sigma$ ,  $\langle e \rangle$  – среднее значение энергии, необходимой для разрушения частиц размером  $\delta$ ,  $\sigma$  – параметр, характеризующий разброс прочностных свойств материала. Совпадение полученных расчетных и экспериментальных данных показывает удовлетворительное качество предложенной модели.

### Литература

1. Жуков В.П., Мизонов В.Е. Оптимальное распределение размеров мелющих тел по длине барабанных мельниц // ТОХТ. – 1995. – Т. 29. – № 6. – С.646-651.

## Моделирование процесса дробления в аппаратах центробежно-ударного типа

Повышение эффективности дробления порошкообразных материалов является актуальной задачей большинства отраслей народного хозяйства. В последнее время возрос интерес к центробежным дробилкам (рис. 1), реализующим свободно-ударный способ разрушения. Свободный удар в отличие от истирания, раздавливания, и стеснённого удара характеризуется самоизмельчением дробимого материала, что приводит к снижению износа мелящих органов. Дробилки данного типа обладают высоким уровнем надёжности, низкими эксплуатационными затратами, возможностью эффективного управления гранулометрическим составом в заданном диапазоне производительности.

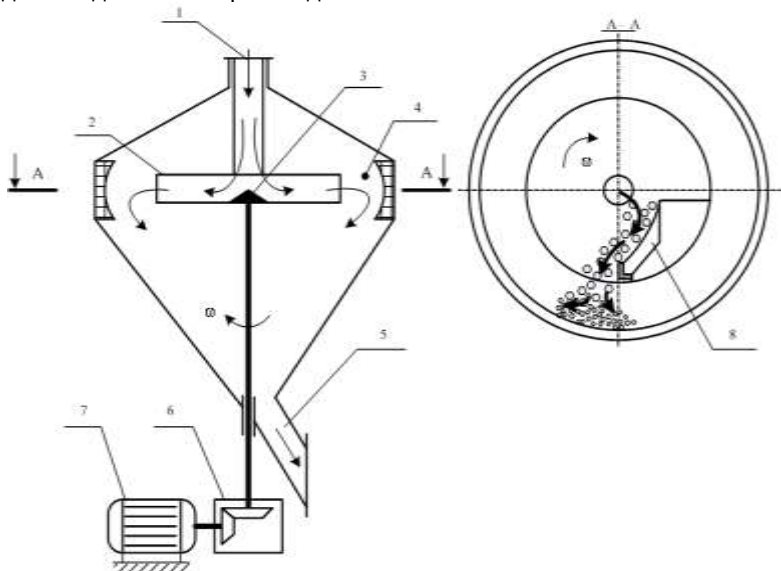


Рис. 1. Принципиальная схема центробежной дробилки:  
1 – питание дробилки; 2 – ускоритель; 3 – рассекатель; 4 – камера дробления;  
5 – выгрузка дробленого материала; 6 – редуктор; 7 – электропривод;  
8 – направляющая лопатка.

Для прогнозирования последствий возможных конструктивных и режимных изменений, нами разработана математическая модель, адекватно описывающая процесс дробления в аппаратах данного типа. Мо-

дель основана на составлении материальных балансов классов крупности до и после разрушения, путём расчёта селективной и распределительной функций измельчения.

Значение селективной функции для каждого класса крупности определяет вероятность разрушения частиц данного размера. Для расчёта значений селективной функции дробления, нами предложена следующая зависимость:

$$P(\delta) = 100 \left( 1 - e^{\left( \frac{-\delta}{a} \right)^k} \right) \quad (1)$$

где коэффициент «а» – определяет размер частиц, вероятность разрушения которых составляет 63,2 %; коэффициент «к» – в случае дробления известняка, является линейно зависимым от производительности дробилки.

Существенным достоинством формулы (1) является наличие предела вероятности разрушения равного 100 %. Другими словами при определённых положительных параметрах «а» и «к» вероятность разрушения частиц произвольного размера всегда будет меньше 100 %. Данное утверждение наглядно проиллюстрировано на рис. 2.

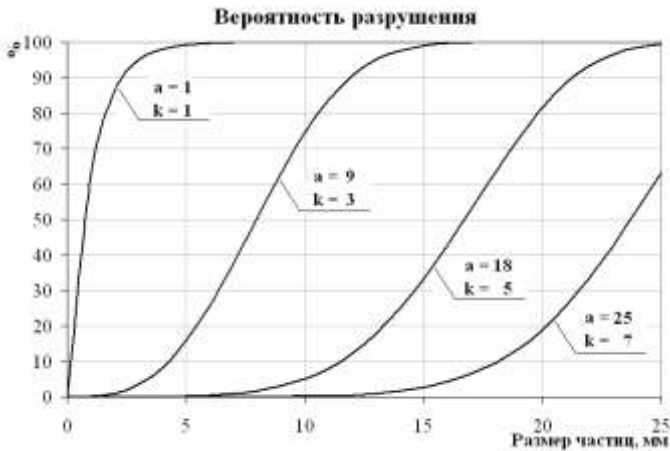


Рис. 2. Селективная функция дробления

Распределительная функция  $F(\delta, \xi)$  определяет вероятность образования осколков  $\xi$  при разрушении частицы  $\delta$ , причём  $\xi < \delta$ .

В качестве данной функции использовалась следующая зависимость:

$$F(\delta_i, \xi) = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\xi - \delta_{\min}}{\delta_i - \delta_{\min}} \right)^m \right]^q \quad (2)$$

где  $m, q$  – параметры вида кривой распределения,  $\delta_i, \delta_{\min}$  – параметры положения кривой распределения, мм.

Коэффициент  $m$  – является параметром идентификации дисперсной среды и зависит от комплекса физико-механических свойств дробимого материала. Параметр  $q$  – зависит как от производительности ( $D$ ), так и от частоты вращения ускорителя ( $\omega$ ). Для его расчёта нами получено следующее выражение:

$$q = (b \cdot \omega + a) \cdot D + d \cdot \omega + c \quad (3)$$

где  $a, b, c, d$  – постоянные величины, численные значения которых были получены при обработке экспериментальных данных по измельчению известняка в дробилке центробежно-ударного типа.

Графическое выражение распределительной функции (2) в координатах:  $F(\xi, \delta)$ ,  $\xi, \delta$ , приведено на рис. 3.

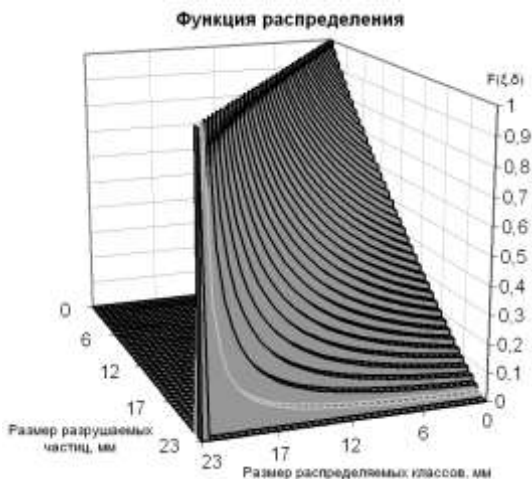


Рис. 3. Распределительная функция при дроблении известняка  $D = 5$  т/ч,  
 $\omega = 500$  об/мин

Как видно из рис. 3, функция (2) заполняет строго половину возможного пространства. Объясняется это тем, что матрица коэффициентов распределительной функции, впрочем, как и её плотности, является диагональной.

Для прогнозирования деформации гранулометрического состава продукта дробления при изменении конструктивных и эксплуатационных параметров дробильного устройства с учётом возможного изменения физико-механических свойств исходного материала в среде Delphi разработана автоматизированная программа. Одна из расчётных экранных форм данной программы приведена на рис. 4.



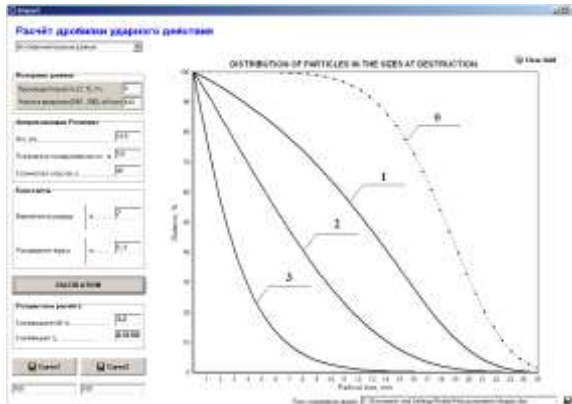


Рис. 4. Расчёт дисперсного состава продукта дробления при изменении режимных параметров дробильного устройства  
 0 – исходный материал; 1 –  $D = 8$  т/ч,  $\omega = 440$  об/мин; 2 –  $D = 5$  т/ч,  $\omega = 600$  об/мин; 3 –  $D = 2$  т/ч,  $\omega = 1000$  об/мин;

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложенное аналитическое выражение (1) применимо для расчёта селективной функции дробления при ударном разрушении. Произведён анализ входящих в данное выражение параметров. Установлена возможность применения зависимости (2) в качестве распределительной функции при крупном и среднем дроблении в центробежных аппаратах, реализующих ударный принцип нагружения. Дано графическое представление результатов исследования входящих в селективную и распределительную функцию параметров. Разработан программный комплекс, позволяющий производить расчёт по предложенной математической модели. Модель идентифицирована с помощью экспериментальных данных приведённых в технической литературе.

### Литература

1. **Потапова Л.Б., Ярцев В.П.** Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005. – 244с.
2. **Kwade A.** Mill selection and process optimization using a physical model // «10th European Symposium on Comminution», 2-5 September 2002. – Heidelberg, Germany.
3. **Борщев В.Я.** Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: Учеб. Пособие. – Тамбов: изд-во Тамбовского Государственного Технического Университета, 2004. – 75с.

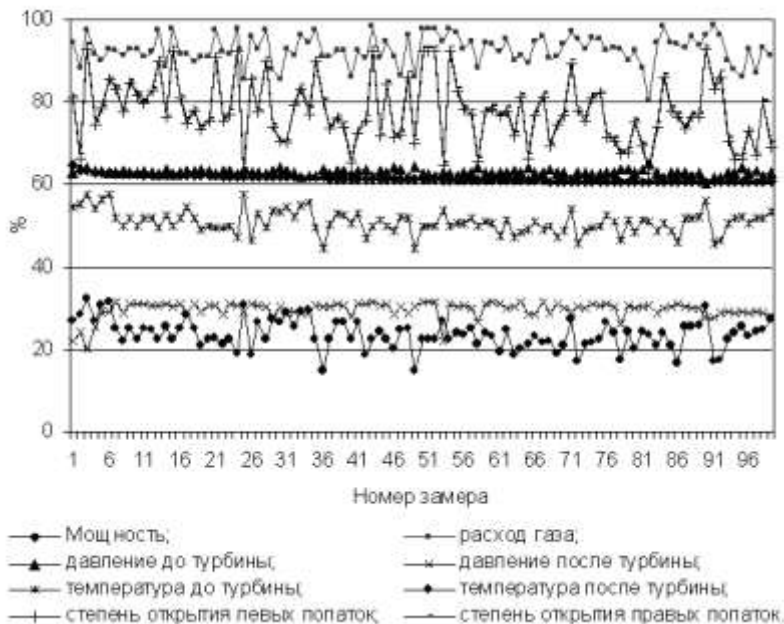
## **Использование нейросетевого подхода для получения режимных карт работы турбины ГУБТ-25**

В последнее время на металлургических предприятиях активно используется потенциальная энергия давления доменного газа для выработки электроэнергии. Для утилизации этой энергии используются газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ).

Для оценки влияния параметров энергоносителя (доменного газа) на выработку электроэнергии ГУБТ-25 на ОАО «Северсталь» был проведен промышленный эксперимент. Турбина ГУБТ-25, установленная за доменной печью № 5, работает на влажном доменном газе. Проходя через проточную часть турбины ГУБТ-25, доменный газ, отдавая энергию давления, охлаждается. При охлаждении газа пар находящийся в газе частично конденсируется и выделяется в виде капелек влаги, которая удаляется через конденсатоотводчики по ходу следования доменного газа. Турбина четырехступенчатая двухпоточная. Регулирование режимов осуществляется с помощью поворотных направляющих лопаток первых ступеней обоих потоков, предназначенных для изменения пропускной способности проточной части турбины в зависимости от расхода доменного газа проходящего через турбину. Они управляются через поворотные кольца гидроцилиндрами, которые в свою очередь управляются либо в режиме дистанционного управления, либо в автоматическом режиме электронно-гидравлической системой регулирования турбины, которая осуществляет поддержание на заданном уровне давления газа под колошником доменной печи № 5. Если выход доменного газа превышает пропускную способность ГУБТ, предусмотрена схема регулирования газа с помощью открытия сбросного клапана перед дроссельной группой при полностью открытых лопатках ГУБТ.

По результатам промышленного эксперимента были собраны следующие статистические данные: мощность на коллекторах генератора турбины, расход доменного газа через турбину, давление и температура доменного газа до и после турбины, степени открытия поворотных лопаток и сбросного клапана в дроссельную группу (рис.). На рис. по оси ординат параметры доменного газа и мощность турбины даны в процентах по отношению к следующим параметрам:

мощности	30 МВт
расходу доменного газа	1000000 м <sup>3</sup> /ч
температуре доменного газа на входе в турбину	100 <sup>0</sup> С
температуре доменного газа после турбины	50 <sup>0</sup> С
давлению доменного газа перед турбиной	3 бар
давлению доменного газа после турбины	0,4 бар



Статистические данные промышленного эксперимента

На основе экспериментальных данных была разработана статистическая модель работы ГУБТ-25. В качестве инструмента был выбран метод моделирования с помощью нейронных сетей. В данном случае работа газовой утилизационной бескомпрессорной турбины во многом зависит от работы доменной печи. Обученная на множестве данных сеть обобщила полученную информацию в виде функциональных связей внутри себя. После этого проверка модели показала неплохие результаты на данных, которые не использовались в процессе обучения. Модель по работе ГУБТ-25 оценивает зависимость мощности турбины от этих параметров. Модель также позволяет определить удельные показатели эффективности использования энергоносителя на газотурбинной расширительной станции (ГТРС) и производить оценку организационно-технических мероприятий по эффективному использованию энергии доменного газа.

Часть параметров, которые влияют на эффективность работы ГУБТ-25, зависят от работы других участков газового цеха. Задачей участка очистки является эффективная очистка доменного газа от пыли и доведения её до нормативного показателя. Задачей участка газовых сетей является доставка газа к потребителю с заданными параметрами: количеством, давлением и температурой. Назначение участка ГТРС состоит в выработке большого количества энергии при эффективной эксплуатации оборудования. Сравнение удельного расхода энергоносителя

с полученным в результате расчета на модели позволяет оценить эффективность использования энергоносителя в газовом цехе при качественном выполнении задач связанных с эксплуатацией участков газовой очистки и газовых сетей.

По моделированию работы ГУБТ была создана программа. Целью создания математической программы по моделированию режимов работы ГУБТ-25 является выявление резервов экономии энергоресурсов на основе их нормирования для выработки электроэнергии на ГУБТ-25, а также прогнозирования выработки электроэнергии при изменении различных параметров, влияющих на мощность турбины в условиях её работы применительно к ГТРС №2 газового цеха ОАО «Северсталь».

Программа «Расчет основных показателей работы ГУБТ-25» позволяет по входным параметрам определить мощность турбины, удельный расход энергоносителя на выработку 1 кВт\*ч, а также КПД брутто эффективности использования энергоносителя после доменной печи. Программа может использоваться в качестве макета расчета нормативных удельных расходов энергоносителя.

В настоящее время программа по моделированию режимов работы ГУБТ-25 используется на ОАО «Северсталь». Использование полученной статистической модели позволило получить режимные карты работы на существующие условия эксплуатации ГУБТ-25. С помощью режимных карт можно определить эффективность работы ГУБТ-25 при изменении режимов работы доменной печи, оборудования газовой очистки, газовых сетей доменного газа и выбрать оптимальные параметры, влияющие на эффективность работы ГУБТ-25 с учётом режимов работы газовой очистки и газовых сетей доменного газа.

Выводы: 1. На основании статистических экспериментальных данных с помощью нейросетей получена математическая модель реализованная в виде программы, которую можно использовать в качестве макета для составления ежемесячного отчета о эффективности работы ГУБТ-25.

2. С использованием программы разработаны режимные карты по работе ГУБТ-25, которые позволяют эффективно эксплуатировать турбину с учетом работы газовой очистки после доменной печи и газовой сети доменного газа.

### Литература

1. **Нагорная О.Ю., Горбунов В.А., Горинов О.И.** Экспериментальное исследование работы ГУБТ-25 на ОАО «Северсталь» // «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения): Тезисы докладов МНТК. – Иваново, 2005. Т. 2.
2. **Нагорная О.Ю., Горбунов В.А., Горинов О.И.** Повышение эффективности использования энергоносителя доменной печи // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов 11 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2005. Т. 2.
3. **Заенцев И.В.** Нейронные сети: основные модели. – Воронеж: ВГУ, 1999.

## Повышение энергетической эффективности газоочистного оборудования

В металлургическом производстве доменный газ, отходящий от доменных печей, является одновременно и топливом и энергоносителем, поскольку содержит в своем составе до 25% CO, до 15% H<sub>2</sub> и выходит под давлением 0,17 ÷ 0,23 МПа с температурой 200÷270 °С. Выход доменного газа с одной печи, в зависимости от её объема, составляет 0,2\*10<sup>6</sup>÷1\*10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>/час. Как топливо доменный газ используется в воздухонагревателях доменных печей, в котлах ТЭЦ, в коксовых батареях и иногда в термических печах. Как энергоноситель доменный газ используется в газорасширительных станциях, где в газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах (ГУБТ) расширяется, отдавая внутреннюю энергию для выработки электрической энергии. Параметры доменного газа после ГУБТ составляют: давление 0,1 МПа; температура 30÷40 °С. Поскольку газ из доменной печи выходит с концентрацией пыли 20÷30 г/м<sup>3</sup>, а у потребителя газ по нормам должен иметь концентрацию не выше 4 мг/м<sup>3</sup>, то этот газ должен проходить очистку.

Существуют два способа очистки доменного газа «сухой» и «мокрый». Наиболее экономичным с точки зрения затрат энергии является «сухой». Одним из наиболее распространенных способов очистки доменного газа является «мокрый», а одна из более распространенных схем состоит из трех ступеней. Первая ступень – это сухой инерционный пылеуловитель (осадительная камера), в котором оседает до 50% пыли в основном крупной фракции. Вторая ступень – это мокрый скруббер. Третья ступень – трубы Вентури с каплеуловителем или их называют скрубберами Вентури. Следует отметить, что в газовую сеть доменный газ поступает после ГУБТ или группы дроссельных клапанов (дроссельной группы), где в результате расширения из газа конденсируется влага вместе с остаточной пылью и через конденсатоотводчики отводится в шламоотстойник. Поэтому ГУБТ и дроссельная группа, по сути, тоже являются газоочистными устройствами. Основное количество орошающей воды в схеме очистки доменного газа приходится на вторую ступень – мокрый скруббер, расход которой находится в пределах от 0,5\*10<sup>3</sup> м<sup>3</sup>/час до 4\*10<sup>3</sup> м<sup>3</sup>/час.

Одним из существенных недостатков мокрого способа очистки является отсутствие контроля качества очистки и, следовательно, отсутствие регулировки подачи воды на очистку. Расход воды на орошение в скруббер подается по интуитивному опыту и естественно с запасом, чтоб была уверенность к требуемому качеству очистки. И поскольку остаточная запыленность доменного газа после очистки не контролируется из-за отсутствия надлежащих приборов, то расход орошающей воды на мокрый

скруббер зачастую подается с запасом в 30–50%, что приводит к неоправданному перерасходу энергии и средств.

Установка приборов контролирующей остаточную запыленность доменного газа после его очистки позволяет рационально использовать орошающую воду и снизить расход до 20%.

Так металлургическое производство с пятью доменными печами на вторую ступень газоочистки в среднем потребляет около 5500 м<sup>3</sup>/час орошающей воды. При установке контролирующей приборов расход воды сокращается на 1100 м<sup>3</sup>/час, что в переводе на эквивалент составит 4,785 млн руб/год.

К другому недостатку мокрого способа очистки относится увлажнение доменного газа парами и каплями воды, что снижает его ценность как топлива вследствие уменьшения теплотворной способности. А это ведет к недогреву дутья в воздухонагревателях доменных печей и как следствие снижение производительности по выплавке чугуна. Увлажнение доменного газа, кроме того, ведет к снижению мощности ГУБТ, поскольку в процессе расширения доменного газа в ней, большая часть энергии расходуется на конденсацию водяных паров и появление капельной влаги. Так на ГУБТ мощностью 20 МВт с расходом доменного газа около 10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>/час конденсируется порядка 10-12 т/час влаги. Повышенная влажность доменного газа снижает и к.п.д. котельных установок заводских ТЭЦ и печей, где используется доменный газ.

Для повышения энергетической эффективности газоочистного оборудования необходимо:

1. Провести анализ существующих схем газовой очистки доменного газа, на основе определения показателей энергетической эффективности по использованию энергии доменного газа.
2. Разработать режимы работы для существующих схем газовой очистки с учётом системного подхода сопряженного с газовой очисткой оборудования (системы охлаждения оборотной воды, газопровода доменного газа, потребителей доменного газа, доменной печи и т.д.)
3. Установить и разработать приборы по учёту эффективности работы газовой очистки по оценке начальной и конечной запылённости за каждым элементом газовой очистки (после доменной печи, после сухого инерционного пылеуловителя, мокрого скруббера, труб Вентури с каплеуловителями, после дроссельной группы, после ГУБТ).
4. Для оценки остаточной влажности доменного газа наладить учет расхода отводимой из конденсатоотводчиков влаги с контролем её температуры.
5. Разработать показатели энергетической эффективности использования потенциальной энергии давления, внутренней и химической энергии доменного газа.

## **Влияние наличия зарядов на частицах аэрозоля на эффективность осаждения в фильтрах тонкой очистки**

Тканевые фильтры тонкой очистки давно и успешно применяются для очистки промышленных газовых выбросов от мелкодисперсной пыли.

В энергетике существует ряд особых условий, когда применение традиционных аппаратов – электрофильтров приводит к громоздким конструкциям и выглядит неоправданным с технико-экономической точки зрения. К таким особым условиям относятся улавливание высокоомных пылей, обеспечение очень малых значений выходной запыленности, улавливание частиц с размером 1 мкм и менее. В этом случае применяются комбинированные электрофильтры, состоящие из собственно электрофильтра и тканевого фильтра тонкой очистки, размещенного последовательно по ходу газа. Это позволяет сочетать благоприятные свойства электрофильтра и тканевого фильтра одновременно.

Электрофильтр, эффективно работая при относительно высокой концентрации частиц, удаляет основную часть пыли на начальной стадии и, далее, тканевый фильтр тонкой очистки при малой концентрации частиц обеспечивает требуемую степень очистки.

Существенной особенностью работы тканевых фильтров как составной части комбинированного фильтра является то, что он улавливает заряженные частицы. Следует рассмотреть, как наличие зарядов на частицах сказывается на эффективности работы тканевого фильтра.

С одной стороны, формирование слоя заряженных частиц в отличие от незаряженных частиц, происходит таким образом, что при приближении частиц к слою и при осаждении частицы испытывают отталкивающее действие со стороны уже находящихся на слое частиц. Поэтому образуется рыхлый слой и уменьшается гидравлическое сопротивление при одной и той же пылеемкости ткани.

С другой стороны, при исследованиях осаждения частиц в волокнистых фильтрах тонкой очистки [1, 2] отмечалось существенное увеличение степени очистки при улавливании заряженных аэрозолей. Авторы отдельных работ расходятся в количественных оценках, но всегда отмечалось, что заряд частиц приводит к снижению проскока в несколько раз. Особенно велико влияние зарядов частиц на их осаждение в фильтрах с относительно большим размером ячеек, например, с пенометаллом или пористым полиуретаном.

Отметим, что в фильтрах тонкой очистки осаждение частиц происходит в каналах внутри фильтра. Преобладающими являются следующие механизмы: инерционный, эффект зацепления, гравитационный и диффузионный. Инерционный механизм сводится к тому, что частица под действием сил инерции выходит из потока воздуха и касается поверхности волокна

фильтра, этот механизм актуален для частиц радиусом более 0,7 мкм. Эффект зацепления определяется касанием частицей поверхности волокна фильтра, когда она движется по линиям потока воздуха, обтекающего волокно фильтра, этот механизм актуален для частиц радиусом от 1,0 до 0,4 мкм. Гравитационный механизм сводится к осаждению частиц под действием силы тяжести, этот механизм актуален для частиц, радиусом более 0,8 мкм. Диффузионный механизм связан с перетоком сторонних включений в потоке газа (частиц аэрозоля) из области большей концентрации в область меньшей концентрации. Так как волокно фильтра осаждает частицы, то область меньшей концентрации частиц и есть область вблизи волокна. Этот механизм актуален для частиц, радиусом менее 0,4 мкм [1, 2].

Во всех этих случаях зарядка частиц и действие электрического поля увеличивают степень осаждения частиц в фильтре.

Степень осаждения в волокнистых фильтрах тонкой очистки рассчитывается на основании теории единичного волокна [1, 2]:

$$\eta = 1 - \exp(-2K_{\text{заб}}CX/\pi R) \quad \text{a)}$$

где  $R$  – радиус волокна или элемента пористой структуры;  $C$  – коэффициент заполнения фильтра, т.е. отношение объема материала к полному объему фильтра;  $X$  – толщина фильтра.

Коэффициент эффективности захвата частиц  $K_{\text{зах}}$  определяется как:

$$K_{\text{заб}} = y_0/R \quad \text{b)}$$

где  $y_0$  – расстояние от оси симметрии, определяющее предельную траекторию частицы, заканчивающуюся осаждением на волокне.

Таким образом, расчет степени очистки сводится к определению коэффициента захвата. Исходным для расчета предельной траектории, определяющей коэффициент захвата, является уравнение движения заряженной частицы в электрическом поле и потоке воздуха:

$$m \frac{dV_{\dot{z}}}{dt} = q\bar{E} - 6\pi\mu a K_{\dot{e}} (\bar{V}_{\dot{z}} - \bar{V}_{\dot{z}0}) \quad \text{c)}$$

где  $q$  – заряд частицы;  $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $\mu$  – коэффициент вязкости воздуха;  $a$  – радиус частицы;  $V_{\dot{z}}$  – скорость частицы;  $V_{\dot{z}0}$  – скорость потока,  $K_{\dot{e}}$  – поправка Кенингема.

$$K_{\dot{e}} = (1 + A_{\dot{e}m}/a)^{-1} \quad \text{d)}$$

где  $l_m = 0,942 \cdot 10^{-7}$  м – эквивалентная длина свободного пробега молекул воздуха при нормальных условиях;  $A_k = 0,86$  – постоянная Кенингема для гладких сферических частиц.

Обычно предполагается, что заряд частиц  $q$  равен предельному заряду, который она получает по ударному и диффузионному механизму ионной зарядки в поле униполярного коронного разряда определенной напряженности [3].

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициента эффективности захвата частиц при различных значениях характерных па-



раметров. При расчетах по уравнению (3) заряд частиц принят равным заряду, приобретенному в поле коронного разряда при  $E_{зар} = 10^5$  В/м.

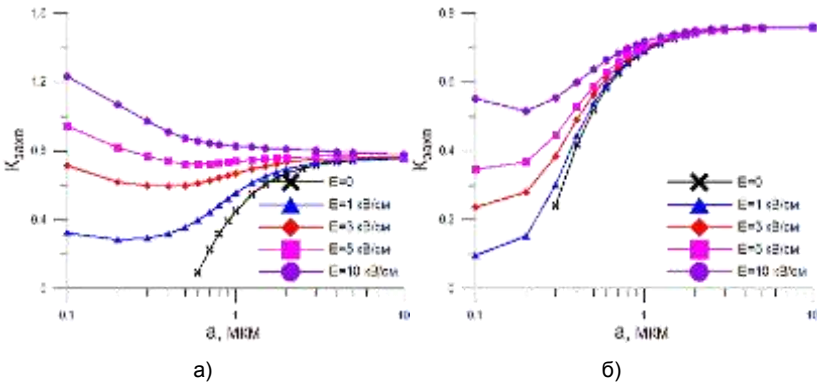


Рис. 1. Зависимости коэффициента эффективности захвата частиц от их радиуса  $a$  при различных значениях скорости потока воздуха  $V_{плот}$  и напряжённости электрического поля  $E$ : а -  $V_{плот} = 0,2$  м/с; б -  $V_{плот} = 0,5$  м/с.

Кривые, изображённые на рис. 1 весьма наглядно демонстрируют рост эффективности осаждения частиц аэрозоля фильтрами тонкой очистки при наличии заряда на частицах аэрозоля и увеличении его значения. Из кривых рис. 1 следует, что влияние заряда и поля особенно велико для частиц радиусом  $1,0$  мкм и менее. Коэффициент  $K_{зах}$  может возрасти в 4 и более раз.

Итак, мы убедились, что наличие зарядов на частицах аэрозоля влияет на эффективность их улавливания фильтрами тонкой очистки, существенно увеличивая её. Проблема образования рыхлого слоя и уменьшения гидравлического сопротивления при осаждении частиц аэрозоля может быть решена эффективной системой регенерации фильтрующего материала фильтра.

### Литература

1. Brown R.C. Air filtration. Pergamon press. 1993.
2. Davies C.N. Air filtration. Academic Press. – London New York, 1973.
3. Дымовые электрофильтры / В.И. Левитов, И.К. Решидов, М.В. Ткаченко; Под общ. ред. В.И. Левитова. – М.: Энергия, 1980.

## **Направления повышения надежности и эффективности функционирования газоперекачивающих компрессорных станций как единого объекта**

Обеспечение надёжности эксплуатации и производственной безопасности компрессорных станций является важнейшей задачей. Технологические процессы, протекающие на компрессорной станции, являются потенциально опасными. Возникновение аварийных ситуаций на предприятиях отрасли могут привести: к человеческим жертвам, к нарушению процесса транспорта газа, что сопряжено с существенными материальными затратами, к необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ, а так же экологическим катастрофам, для ликвидации последствий которых необходимы значительные финансовые затраты, а на восстановление природной среды уходят многие годы.

В соответствии с Федеральным законом 116 от 21 июля 1997 года «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» необходимо проведение экспертизы промышленной безопасности, а так же мониторинг и техническое диагностирование отдельных узлов и оборудования опасных производственных объектов, коими являются газоперекачивающие компрессорные станции. Компрессорную станцию необходимо рассматривать как единый объект. Для этого нужны математические и диагностические модели как оборудования, так и процессов, протекающих в них. Все это необходимо для того, чтобы иметь возможность оценки процессов как в режиме реального времени, так и прогноза их развития.

В настоящее время для решения означенных проблем существуют объективные условия. В первую очередь они обусловлены развитием и широким внедрением современной микропроцессорной техники, которая позволяет получать производственную информацию. Стационарные информационно-измерительные системы (ИИС) системы диагностики (СД) позволяют получать, накапливать и сохранять в течение практически неограниченного времени массивы производственных данных, к которым относятся не только текущие рабочие параметры оборудования, но и электронные базы данных диспетчерских служб. Особое внимание должно быть уделено разработке новых математических методов обработки данных и построения на их основе математических моделей технических систем. К ним относятся методы нечеткой логики, теоретико-игровые методы, нейронные сети, клеточные автоматы и многие другие, разработанные и успешно применяемые в таких областях, как экономика и финансы, метеорология, геофизика, прогнозирование чрезвычайных ситуаций, но не нашедшие широкого применения в газовой отрасли.

Общая структура задачи повышения надежности и эффективности функционирования компрессорной станции, как единого объекта может быть представлена в виде упрощенной схемы (рис. 1). Основой для постановки и решения задачи являются исходные данные ИИС, на основе которых строятся математические модели, описывающие характеристики объектов и изменение их параметров во времени. Это могут быть показатели надежности оборудования, параметры, характеризующие текущее техническое состояние объекта, или отдельный параметр, определяющий эффективность того или иного технологического процесса.

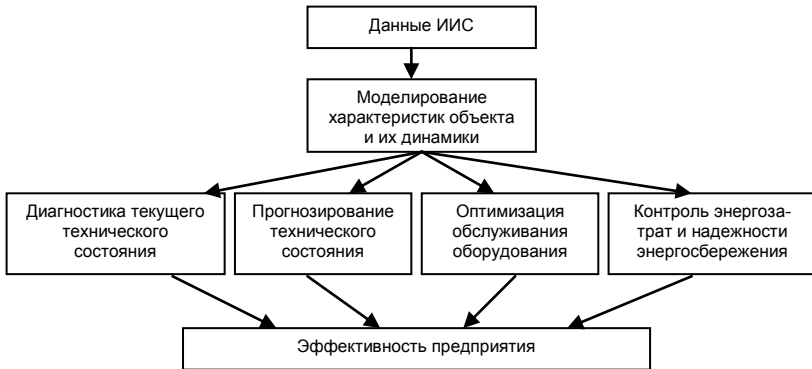


Рис. 1. Общая структура решения задачи повышения надежности и эффективности газоперекачивающих предприятий ОАО «Газпром» с использованием ИИС

Построение адекватной математической диагностической модели, отдельного объекта, единицы оборудования или его узла, имеет целью прогнозировать изменения его технических показателей или параметров надежности во времени. Прогноз, в свою очередь, позволяет принимать обоснованные решения для проведения мероприятий по техническому обслуживанию, планированию ремонтов, оснащению ремонтно-технических служб необходимым оборудованием и комплектованию резервного фонда оборудования. Неотъемлемой составной частью проблемы повышения надежности эксплуатации и энергоэффективности газоперекачивающих предприятий является разработка методов рационального энергоснабжения. Энергетическая составляющая в себестоимости углеводородного сырья достигает 15%, а непрерывность технологических процессов в газовой отрасли непосредственно связана с бесперебойностью энергообеспечения. Повышение эффективности функционирования компрессорной станции достигается путем решения всего комплекса перечисленных задач.

Эффективность производства является важным аспектом проблем транспорта газа и функциональности ОАО «Газпром». Под эффективностью понимается в первую очередь уровень затрат всех возможных ресурсов, в том числе и энергетических на поддержание функционирования

предприятия. Издержки производства, как одна из основных составляющих себестоимости продукции, в настоящее время являются серьезным препятствием для конкурентоспособности российского углеводородного сырья на международном рынке. Поэтому в последнее время настоятельно требуется разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Разработка методов решения перечисленных задач должна строиться с учетом возросшего уровня качества и объема исходной информации, обеспечиваемого автоматизированными системами контроля и диагностики, широко используемыми на предприятиях отрасли.

УДК 615.471.3

С.Н. КАДНИКОВ, д.т.н., проф., И.М. СОЛОВЬЕВ, асп.  
(ИГЭУ)

### **Методика определения характерных признаков коррелированных биологических сигналов**

В данном сообщении рассматриваются различные подходы к выделению характерных признаков групп биологических сигналов. В каждой из групп сигналы могут коррелировать друг с другом. Кроме того, вся совокупность групп сигналов должна быть разделена на отдельные классы по принципу статистической однородности [1]. Для того чтобы выяснить степень корреляции отдельных сигналов внутри каждой группы, а также степень статистической связи между группами, необходимо определить характерные признаки каждого сигнала. Число этих признаков должно быть минимально, поскольку при большем количестве признаков степень достоверности статистических выводов может снижаться, а время статистической обработки существенно возрастать. Кроме того, возможность получения небольшого количества признаков диктуется характером самого сигнала. Один из типичных сигналов представлен на рис. 1.

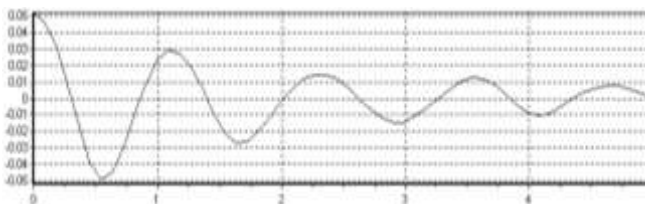


Рис. 1. Сигнал длительностью 4,99 мс

Сигнал, как правило, является затухающим колебанием с длительностью от 5 мс до 35,2 мс. При увеличении длительности сигнал теряет свою простую структуру, представленную на рис.1 и не имеет явных признаков затухания и периодичности, рис. 2.

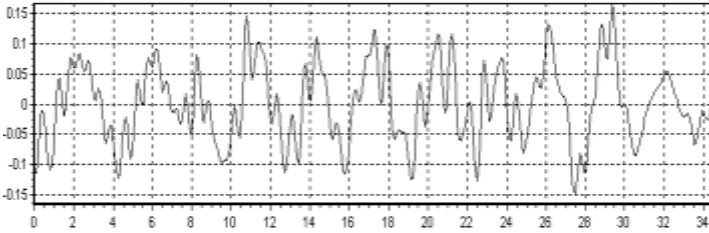


Рис. 2. Сигнал длительностью 35,2 мс

При статистической обработке такие сигналы должны быть отброшены, т.е. должны считаться артефактами.

Простейшим способом аппроксимации сигнала, данного на рис. 1 является представление его в виде суммы затухающих синусоид:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{-\alpha_k t} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1)$$

где  $A_k$ ,  $\alpha_k$ ,  $\omega_k$ ,  $\varphi_k$  – неизвестные параметры, подлежащие определению.

Неизвестные параметры в формуле (1) вычислялись по методу наименьших квадратов (МНК). Численные эксперименты показали, что при  $n = 1$  можно добиться относительной точности аппроксимации не лучше 0,27 для всех сигналов данной группы. Смысл этого результата состоит в том, что сигналы каждой группы, создаваемые одним источником имеют в своей основе характерные колебания приблизительно одинаковой структуры. Однако степень подобия этих структур не выше 25%, что требует использования дополнительных признаков. Введение дополнительных синусоид в сумму (1) дает резкое замедление сходимости, т.е. характер дополнительных признаков при увеличении их числа становится размазанным и неопределенным. К тем же самым результатам приводит и введение дополнительных нелинейностей в формулу (1). Это происходит, например, когда постоянные амплитуды  $A_k$  заменяются полиномами, как и показатели экспонент  $\alpha_k$ . Проверялась так же и с тем же успехом нелинейная зависимость от времени фазовых сдвигов  $\varphi_k$ . Причин недостаточно точной нелинейной аппроксимации может быть две – неадекватность характера нелинейности внутреннему сигналу и что более вероятно – широкий спектр разницы между исходным сигналом и аппроксимацией одной затухающей синусоидой.

Проверялась также аппроксимация сигналов полиномами Эрмита и Легерра [2]. В случае полиномов Эрмита сигнал представлялся в виде:

$$x(t_i^*) = \sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(t_i^*), \quad (2)$$

где  $\varphi_n(t^*) = (2^n n! \sqrt{\pi})^{-1/2} H_n(t^*)$ ,  $H_n(t^*)$  – полином Эрмита нормированного аргумента  $t^* = \Delta t / t_1$ ,  $t_1$  – длительность сигнала.

Численные эксперименты показали, что для обеспечения точности  $\delta \leq 0,1$  в среднем достаточно 30 полиномов (30 коэффициентов  $A_k$ ). Минимальное количество полиномов в рабочем диапазоне было равно 7, максимальное – 50.

Примерно те же результаты были получены и при использовании полиномов Лагерра. Полученные результаты говорят о том, что ортогональные полиномы данного вида, так же как и затухающие синусоиды, не дают возможности существенно минимизировать количество характерных параметров (признаков) сигналов.

В связи с этим для аппроксимации рассматриваемых сигналов был выбран метод разложения в ряд Фурье и анализ спектров. Характерный пример спектрального разложения представлен на рис. 3.

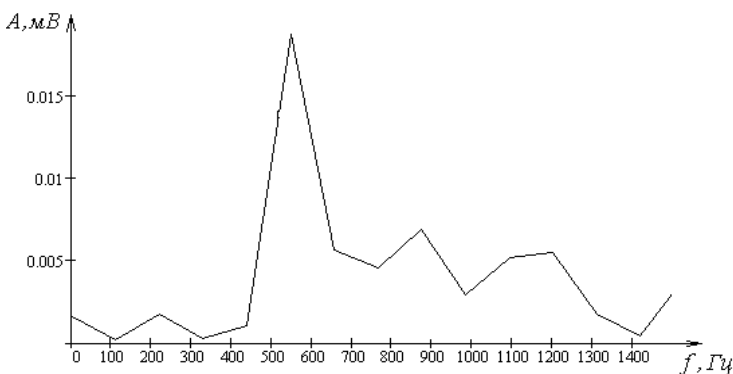


Рис. 3. Разложение по спектрам на всем периоде (с учетом симметричности) ( $T=9,161$  мс)

На кривой отчетливо виден доминирующий пик, а также еще несколько пиков с меньшими амплитудами. Экспериментальным путем было установлено, что в пределах каждой группы спектрограммы сигналов содержали один или два доминирующих пика. Дальнейшие исследования показали, что кроме основного доминирующего пика информативными могут быть не более двух пиков меньшей амплитуды. Если наблюдается два пика примерно одинаковой амплитуды, то это, как правило, является наложением сигналов от двух различных источников. Дальнейшие численные эксперименты показали, что если исключить наложение сигналов, метод рядов Фурье позволяет провести достаточно достоверную статистическую обработку сигналов данного вида.

### Литература

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 340 с.
2. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

УДК 615.471.3

С.Н. КАДНИКОВ, д.т.н., проф., И.М. СОЛОВЬЕВ, асп., С.Ю. СМИРНОВ  
(ИГЭУ)

## Разработка и использование методов кластеризации в задаче анализа суточной записи ЭКГ

При анализе суточной записи ЭКГ одними из основных функционально значимых задач являются задачи исключения артефактов и классификации QRS-комплексов. Качество решения именно этих задач во многом определяет качество всей системы автоматического анализа суточной записи.

Будем предполагать, что некоторым образом уже определены участки электрокардиосигнала (ЭКС), в каждом из которых может содержаться один QRS-комплекс, или не содержаться QRS-комплексов вовсе (то есть содержится некоторый всплеск (обычно это артефакт или высокий Т-зубец), ошибочно детектированный как QRS-комплекс). При этом полагаем, что для каждого такого участка ЭКС определена *опорная точка* – точка, в которой достигается максимум сердечной активности в каком-либо смысле (то есть максимум некоторого функционала от ЭКС) на этом участке. Для опорной точки должно выполняться требование *устойчивости*, которое означает малый сдвиг опорной точки при малом изменении ЭКС вблизи нее. Обычно опорная точка должна указывать на R-зубец.

Отложив в обе стороны от опорной точки некоторые фиксированные расстояния, получим отрезок ЭКС. Данный отрезок будем называть *комплексом*, если указанные фиксированные расстояния таковы, что полученный отрезок гарантированно содержит QRS-комплекс целиком, когда он присутствует, но не может содержать более одного комплекса. Каждый комплекс, таким образом, представляет собой последовательность отсчетов фиксированной длины. Будем также предполагать, что известен номер соответствующего опорной точке данного комплекса.

Задачи классификации QRS-комплексов и определения ложных QRS-комплексов, по существу, можно объединить в одну задачу классификации комплексов.

Решение задачи классификации комплексов включает в себя два этапа: *кластеризацию* и *типизацию*. Под кластеризацией понимается разбиение множества комплексов на непересекающиеся подмножества близких в некотором смысле друг другу комплексов. Эти подмножества (*кластеры*) не должны содержать комплексы разных типов. Под типизацией понимается присвоение каждому кластеру некоторого типа из заранее определенного списка типов комплексов.

Некоторые исследователи (см., например, [1]) рекомендуют использование малого числа «достаточно надежных» критериев (факторов) кластеризации, например, ширину QRS-комплекса, отношение длины его контура к площади фигуры, ограниченной им и осью времени, полярность R-зубца и так далее. Описанный тип алгоритмов имеет ряд недостатков.

- Процесс выявления самих факторов, их весовых коэффициентов и условий отнесения комплекса к тому или иному кластеру обычно занимает большое количество времени и нет гарантии в его успехе.

- Даже при успешно реализованном алгоритме кластеризации имеется вероятность сбоев в его работе, поскольку внутренние механизмы алгоритма кластеризации исследователю до конца не известны, а подобраны эмпирическим путем.

- Исправление алгоритма с целью повышения его качества зачастую затрагивает всю его внутреннюю логику, и значительно увеличивает объем кода.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что подобрать небольшой набор «надежных» критериев кластеризации чрезвычайно сложно. Более простым способом представляется непосредственное использование достаточно большого числа критериев, с некоторой точностью (но достаточно полно) описывающих комплекс. Наиболее естественным таким набором факторов является набор отсчетов некоторого функционала ЭКС на отрезке времени, соответствующему исследуемому комплексу. Каждый такой набор будет являться некоторой точкой в многомерном пространстве, каждое измерение которого соответствует некоторому фактору. Это пространство назовем *факторным пространством*. Множество векторов в факторном пространстве, отвечающих рассматриваемым комплексам, назовем *факторным распределением*. Преимуществом такого подхода является возможность в качестве критерия близости двух точек факторного пространства использовать стандартные метрики, например, метрику, индуцированную евклидовой нормой. Использование такой метрики решает одну важную проблему: если функционал ЭКС, используемый при построении факторного распределения, достаточно точно передает все особенности комплекса (что, разумеется, несложно обеспечить), то евклидово расстояние является достаточно адекватной мерой «похожести» двух комплексов. Таким образом, мы не нуждаемся в длительной процедуре подбора критериев «похожести», которая неизбежна при малом числе факторов.

Однако при таком подходе возникают и естественные трудности, связанные с большим объемом анализируемой информации (велика размерность факторного пространства и велик объем факторного распределения).

Предлагается следующий алгоритм кластеризации комплексов, основанный на применении принципа разбиения факторного пространства на непересекающиеся ячейки:

1. Запись ЭКС фильтруется полосовым фильтром с полосой пропускания от 2 до 45 Гц (используется рекурсивный фильтр второго порядка, прогнанный в прямом и обратном направлениях).

2. Составляются отрезки фильтрованной записи длиной 200 мс, имеющие в середине опорную точку комплекса. Частота квантования этой записи равна 150 Гц (то есть на отрезке 200 мс умещается 30 отсчетов).



3. Из полученного на этапе 2 функционала вычитается среднее взвешенное значение.

4. Полученный на этапе 3 функционал умножается на гауссово окно с центром в опорной точке и средним квадратическим отклонением 200 мс.

5. Факторное пространство разбивается на ячейки (например, на гиперкубические) таким образом, что расстояние между центрами соседних ячеек равно 0,25.

6. Для каждой  $k$ -й непустой ячейки находим центр тяжести  $c_k$  попавших в нее точек распределения и вес, равный количеству этих точек.

7. Для каждой  $k$ -й ячейки находим стационарную точку следующим образом:

- Вычисляем центр тяжести всех точек  $c_m$  (с учетом весов), удаленных от точки  $c_k$ , не более чем на 0,4. Эта точка считается начальным приближением для стационарной точки.

- В качестве следующего приближения стационарной точки, берем центр тяжести всех точек  $c_m$ , удаленных от точки предыдущего приближения, не более чем на 0,4.

- Процесс повторяется до тех пор, пока стационарная точка не стабилизируется (сходимость гарантируется, поскольку метод определения стационарной точки в точности соответствует первому шагу известного метода «Форель-1»).

8. Представители ячеек, соответствующих одной и той же стационарной точке попадают в один кластер; соответствующих разным стационарным точкам – в разные.

9. Если расстояние от центра тяжести кластера до его наиболее удаленной точки более 2, то данный кластер разбивается на более мелкие кластеры методом «Форель-1» (с радиусом 2).

Представленный алгоритм обеспечивает не более одной точки сгущения внутри одного кластера и относительно малый радиус каждого кластера (степень малости радиуса задается извне).

### Литература

1. Дабровски Б., Дабровски А., Пиотрович Р. Суточное мониторирование ЭКГ. – М.: Медпрактика. 208.
2. Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
3. Елисеева И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов. – М.: Статистика, 1977. – 144 с.

## **Методика кластерного анализа биологических сигналов**

В качестве доминирующего признака при проведении кластерного анализа групп биологических сигналов может быть использована частота максимального амплитудного пика спектра сигнала, полученного с помощью БПФ. Было определено, что однородности данного признака значительно больше однородности остальных признаков, но не является высокой. Это дает основания к предположению о том, что из всех имеющихся сигналов возможно будет выделен не один кластер, а несколько. Значения частот исследуемых сигналов колеблются в пределах от 192 Гц до 2580 Гц. Таким образом, задачей кластерного анализа является выделение по частотам групп (кластеров) сигналов, что даст возможность к проведению диагностирования на основе признаков сигналов, попавших в кластеры.

Важной частью кластерного анализа является определение подхода к его реализации. Вероятностно-статистический подход не может быть использован в «чистом виде», так как он подразумевает изначальное предположение о числе кластеров. Такого предположения нельзя сделать, так как нам неизвестно число классов разбиения. Однако полностью отказаться от данного подхода невозможно, так как была выдвинута гипотеза о том, что выборки представляют собой реализацию нормально-распределенной случайной величины (именно вероятностно-статистический подход предполагает выделение групп, каждая из которых представляет собой реализацию некоторой случайной величины по некоторому закону распределения). В случае, когда число кластеров заранее неизвестно, используется структурный подход, который отыскивает «естественное разбиение». Таким образом, для получения результатов, необходимо использовать синтез этих двух подходов, вероятностно-статистического и структурного: отыскать такое разбиение на изолированные классы, что каждому из них свойствен закон распределения, а именно нормальный закон.

Первым этапом кластерного анализа является группировка. Она проводилась на основе следующего алгоритма.

Для выявления внутри каждой серии сигналов кластеров (групп) используется корреляционный анализ. Его смысл состоит в количественном измерении степени сходства различных сигналов.

Для реализации алгоритма вначале вычисляются коэффициенты корреляции между всеми парами сигналов внутри каждой серии по формуле:

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \cdot \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты сигналов,  $n$  – меньшая из длительностей пары сигналов.

Для каждой серии будем иметь таблицу следующего вида.

Табл. 1. Таблица корреляции одной серии

	Сигнал1	Сигнал2	Сигнал3	...	Сигнал m
Сигнал1	1	$\rho_{12}$	$\rho_{13}$	...	$\rho_{1m}$
Сигнал2	$\rho_{21}$	1	$\rho_{23}$	...	$\rho_{2m}$
Сигнал3	$\rho_{31}$	$\rho_{32}$	1	...	$\rho_{3m}$
...	...	...	...	...	...
Сигнал m	$\rho_{m1}$	$\rho_{m2}$	$\rho_{m3}$	...	1

Эта матрица симметрична относительно главной диагонали, что позволяет снизить временные затраты на ее обработку, и на главной диагонали стоят только единицы (сигнал сам с собой коррелирует на 100%).

Основная идея алгоритма кластеризации заключается в следующем:

Чтобы с матрицей корреляции было удобно работать в процессе выделения кластеров, приведем матрицу типа «объект-объект» к матрице содержащей в качестве элементов 0 и 1 (назовем ее сигнальной матрицей).

Для этого, нам понадобится ввести некоторый порог корреляции  $k_0$  (его требуется подобрать экспериментальным путем, см. ниже). Если коэффициент корреляции превысил заданный порог  $k_0$ , то соответствующему элементу матрицы присваивается единица (1), если нет, то ноль (0). В результате получается матрица (симметричная относительно главной диагонали), заполненная единицами и нулями.

Далее нужно преобразовать сигнальную матрицу к другой (с помощью перестановки строк и столбцов), которая должна содержать квадратную подматрицу, заполненную только единицами. Диагональ этой подматрицы должна совпадать с диагональю исходной матрицы. Таких подматриц будет несколько, из них нужно выбрать подматрицу наибольшего размера. Номера элементов (сигналов) в этой максимальной подматрице и образуют кластер.

### Алгоритм построения кластеров

#### Исходные данные:

1. N сигналов.
2. Матрица  $[N \times N]$  – матрица корреляции сигналов между собой.
3. Требуемый размер кластера – R1 (в процентах).
1. Чтобы оценить коэффициенты корреляции понадобится некоторое пороговое значение коэффициента корреляции  $k_0$ . Для его вычисления будем использовать предполагаемый размер кластера (в про-

- центах). Размер кластера, естественно, не должен превышать 100%. Исходя из размера кластера в процентах, вычисляем его линейные размеры (с округлением вниз):  $RL1 = \text{Int}(N \cdot R1 / 100)$ .
- Исходя из линейных размера кластера, и требования наличия единиц в результирующей матрице на всей главной диагонали (число единиц равно линейному размеру кластера), вычисляем минимально необходимое число единиц в исходной матрице, чтобы была хотя бы теоретическая возможность построить необходимую результирующую матрицу:  $C = RL1 \cdot RL1 + (N - RL1)$
  - Вычисляем минимально возможный коэффициент  $k_0$ , при котором после преобразования исходной матрицы к матрице из единиц и нулей число единиц будет не меньше  $C$ .
  - Строим матрицу из единиц и нулей, используя исходную матрицу и найденное  $k_0$  по алгоритму, описанному выше.
  - Переставляем строки и столбцы в матрице, обязательно сохраняя на главной диагонали единицы. Алгоритм перестановки – построение дерева с использованием случайно-упорядоченного поиска (то есть сначала переставляются строки с наибольшим количеством единиц).
  - Если дерево достигает глубины  $2 \cdot N + 1$ , а искомые кластеры не найдены, то увеличиваем коэффициент  $k_0$  на 0,01 и повторяем процесс с пункта 4.
  - В конечном итоге, требуемый кластер будет построен. После этого уменьшаем коэффициент  $k_0$  до тех пор, пока в кластере и на главной диагонали остаются единицы.
  - Полученный  $k_0$  является окончательным. А из полученной матрицы берем номера исходных сигналов, которые вошли в кластер.

Применение данного алгоритма позволило сделать следующие выводы:

- Внутри каждой из групп можно выделить несколько кластеров, причем один из них, соответствующий частотному диапазону вблизи доминирующего пика, содержит максимальное количество сигналов.
- Средний корреляционный коэффициент внутри доминирующего кластера данной группы существенно больше (на 30-40%) такого же коэффициента доминирующего кластера другой группы, что создает предпосылки для диагностирования признаков в каждой группе.

### Литература

- Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176с.
- Алгоритмическое и программное обеспечение прикладного статистического анализа. – М.: Наука, 1980. – 424с.

## **Защита информационных ресурсов – основа экономической безопасности региона**

**Введение.** Коренные преобразования в политической, экономической, социальной и духовной жизни общества неразрывно связана с системой управления экономикой страны и составляющих ее регионов. Важную роль в выполнении поставленных задач по переходу к эффективной рыночной экономике принадлежит информационным ресурсам (ИР). Только на основе анализа полной, своевременной и достоверной информации можно провести реальную аналитическую оценку темпа экономических преобразований в регионе, деятельность субъектов хозяйствования в новых экономических условиях и на ее основе оперативно и обоснованно принимать управленческие решения по усилению экономической безопасности региона (ЭБР). Процесс управления ЭБР производится системой состоящей из совокупности элементов, образующих структуру с определенными функциями, и имеющей целью предвидения возникновения вероятной опасности и наличие возможности влиять на этот процесс [1]. Важным фактором для принятия целесообразного решения по управлению ЭБР являются развитые и оперативно функционирующие информационные технологии (ИТ).

Понятие «информационные технологии» имеет место в любой сфере деятельности человека и общества. Само понятие «информация» достаточно универсально и многогранно. Ценность информации проявляется и как товар, и как ресурс, аналогичный ресурсам энергетическим, материальным, трудовым, финансовым и т.д. Понятие «информация» определяется как сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах независимо от формы, сроках и методах их представления. Человек, организация или регион в процессе своего возникновения и развития сталкивается с «информационным процессом», стимулирующим обращение потребителя информации к существующим ИР, в качестве пользователя доступной информации.

Информация является питательной средой для возникновения, функционирования и развития самых различных технических, биологических и социальных систем. С появлением универсальной размерности информации, развитием сетей телекоммуникации и связи, повышением скорости её передачи и обработки, а также с появлением «Интернета», информация стала не только объектом купли-продажи, но и объектом охоты и шпионажа. В эпоху развитых наукоемких технологий информация превратилась в товар повышенного спроса и поэтому задача сбора, хранения и эффективная защита от несанкционированного доступа стала весьма актуальной. Важность информации выросла до уровня фундаментальных категорий, как энергия, масса, и всего того объективного и субъек-

ективного, что существует в пространстве и во времени, так как количественно и качественно описывает и характеризует эти категории.

Мировая экономическая система, все развитые страны мира уже давно находятся в стадии полной информатизации общества путем внедрения ИТ во все производственные, социальные и другие сферы деятельности человека. Россия также вступила на этот, необходимый для создания эффективной экономики и политики, путь.

Информация является также количественным и качественным содержанием ИР региона. Современные ИТ позволяют отображать в виде единиц информации любые понятия человеческих знаний, характеристики объектов и процессов, а также успешно обрабатывать их.

Владение и использование научно-технической, экономической и другой информации, содержащей государственную, коммерческую или корпоративную тайну предусматривает необходимость создания и функционирования системы информационной безопасности, которая является важнейшей и необходимой составляющей системы ЭБР [2].

**Роль информационных ресурсов в управлении ЭБР.** Для любого региона в зависимости от организационной и технологической структуры, характера и масштаба деятельности, а также от величины влияния на потребителей других регионов результатов этой деятельности, наступает момент, когда определенная часть собственных ИР принимает конфиденциальный характер.

Существующие во многих видах производства и отраслях регионального хозяйства специальные программные средства дают возможность не только оптимизировать процесс оперативной обработки научно-технической, производственной, экономической и другой информации, но также позволяют эту информацию аккумулировать и в заданном формате сохранять в специальных массивах базы данных. Применение ИТ в формировании, обработке и хранении информации ускоряет процесс нахождения нужной информации и повышает эффективность ее использования, в тоже время усложняет ее защиту от несанкционированного доступа. Широкое использование специальных программных средств, глобальных телекоммуникационных сетей (Интернет) дает возможность оперативно находить, получать и передать практически любую информацию. При этом, однако, защитить информацию от не санкционированного доступа является достаточно сложной задачей.

В советский период большинство регионов располагало множеством объектов особого назначения, для защиты которых был задействован специальный режим секретности и поэтому ряд населенных пунктов был закрыт для иностранных резидентов. В настоящее время открытость многих городов усложнила организацию защиты конфиденциальной информации о таких объектах.

Для управления деятельностью и развитием региона и его структур важнейшим элементом является экономическая информация (ЭИ). Она является интегрированным показателем прогресса или регресса экономики региона и содержит количественные и качественные характери-

стики о различных объектах, производственных процессах и управляющих ими системах. Процессы сбора, обработки и передачи информации приведены в табл. 1.

Таблица 1. Структура информационных процессов и их назначение

Процесс	Назначение
Поиск и выявление	Выявление источника информации, идентификация его параметров и определение степени защиты.
Получение и сбор	Разработка способов и средств защиты и определения объема необходимого носителя информации.
Учет и обработка	Организация системы учета и регистрации полученной информации и подготовка к сохранению.
Транспортировка	Перенос информации в пространстве с помощью систем передачи данных и телекоммуникационных сетей (проводная, волоконно-оптическая, радио- и космическая связь).
Хранение	Создание массива данных и хранение их в специальных носителях информации для обработки и использования.
Безопасность	Обеспечение защиты информации от несанкционированного доступа организационно-правовыми, материально-техническими и технологическими и программными средствами.

Обладание и возможность использования научно-технической, коммерческой и другой информацией, что в основном составляет государственную или корпоративную тайну, получением которой занимается конкурентная разведка, определяет необходимость обеспечения информационной безопасности, которая входит составляющей частью ИТ. Существует также термины: юридическое или правовое обеспечение ИТ или АСУ, имеющие предназначение, кроме безопасности, удостоверяющие аспекты достоверности информации (например, электронная подпись).

Полученная продуктивная информация и ее соответствующая обработка позволяет конкурентам повысить эффективность развития собственного научно-технического и экономического потенциала в различных сферах человеческой деятельности. Учитывая чрезвычайную важность и необходимость закрытия информации от конкурентов, повышается роль систем информационной безопасности [3].

**Социально-экономические цели и интересы регионов.** Цель – это конкретизация интересов региона в форме доступной для системы управления процессом их реализации. Кратко обозначим цели и интересы региона в лице его руководства, с одной стороны, и бизнесом (предпринимателями, руководителями предприятий, фирм, компаний), с другой стороны. Целями любого бизнеса является получение максимальной прибыли (зачастую в ущерб ЭБР, а также другим фирмам и бизнесменам).

Тактическими и стратегическими целями, провозглашаемые руководством региона, является сохранение и повышение уровня экономической, социальной, политической, национальной и другой безопасности,

что соответствует повышению уровня жизни и безопасности населения, достижение которых может идти в разрез с бизнес-целями отдельных фирм и компаний.

Для бизнеса в тактическом и стратегическом плане естественно наличие постоянного желания повышать стоимость (цены, тарифы) на продовольственные и промышленные товары (особенно, первой необходимости), разного рода услуги и энергоносители. Реализация возможностей повышения стоимостных порогов на товары и продукцию особенно заметно для предприятий-монополистов.

Нахождение балансов интересов и целей сторон может быть обусловлено следующими достаточно существенными признаками:

а) интересы региона существуют объективно, независимо от интересов руководства этого региона и бизнесменов. Например, экономическая, энергетическая, экологическая (ЭЭЭ) безопасность для населения, различных хозяйственных и инфраструктурных организаций, расположенных в регионе. Снижение уровня их безопасности чревато катастрофой, как для руководства региона, так и для бизнесменов и их предприятий.

б) руководство фирм, компаний и их работники имеют свои естественные корпоративные экономические интересы, достижение которых часто противоречат федеральным и местным (региональным) законам. Например, нарушение природоохранных мероприятий.

Необходимо отметить, что регион по статусу и живучести имеет большое отличие от фирм и компаний, тем, что ее существование и жизнедеятельность не может быть ограничена во времени. Регион (в составе РФ) не может быть обанкрочен, ликвидирован, у него не может быть нарушена ЭЭЭ безопасность (без учета глобальных катастроф). Кроме того, при реализации целей и интересов региона необходимо соблюдать интересы и законы страны и, возможно, интересы других регионов (например, угрозы поднятия уровня Чебоксарского водохранилища для Нижегородского региона). Экономические интересы руководства региона и фирм (компаний) могут не совпадать, кроме тех которые отвечают за сохранение государственной безопасности и реализацию общечеловеческих ценностей.

Консолидация указанных выше интересов (вне желания обоих сторон) наступает при реализации, в каждом отдельно взятом регионе, гарантированных Конституцией РФ прав и свобод, а также наличие местных законов, необходимых к постоянному и неукоснительному исполнению и природно-климатических условий, которые вообще невозможно изменить искусственно.

Основной особенностью отдельно взятого региона является наличие местных ресурсов, интеллектуального потенциала, объектов хозяйствования, а также природно-климатических условий. Одним из условий существования (то есть наличие нормативного уровня экономической и других видов безопасности) региона является ее устойчивое социально-экономическое развитие, основанное на расширенном



воспроизводстве и сохранении и повышении ресурсного потенциала региона. Для этого всем регионам необходима мощная и постоянная федеральная поддержка и понятная и прозрачная политика по методам и критериям использования выделенных финансовых и других ресурсов, особенно, для дотационных территорий. Самодостаточные регионы находятся в свободном режиме определения собственных тактических и стратегических целей, ограничения для которых определяется законодательством Российской Федерации.

**Статистическая информация в управлении ЭБР.** Основными задачами государственной статистики является:

- сбор, обработка и представление статистической информации (СИ) о деятельности всех отраслей экономики;
- применение научно обоснованной статистической методологии обработки информации, соответствующей российским и международным стандартам и потребностям заказчика;
- гарантирование полноты и объективности информации;
- предоставление пользователям равного доступа к открытой СИ о социально-экономическом положении региона.

Официальная СИ предоставляет возможность руководству региона и бизнесу организовать оптимальное управление пространственной экономикой с обеспечением ЭБР. СИ можно классифицировать следующим образом:

- отраслевая статистика: наука, образование, промышленность, сельское хозяйство, агропромышленный комплекс, машиностроение, строительство, инвестиции, энергетика, транспорт, связь, услуги, социальный комплекс, демография, уровень жизни населения;
- межотраслевая статистика: финансовые рынки, цены (тарифы), рынки труда и занятость населения, товарные рынки и торговля, внешне-экономическая деятельность.

Используя достоверную СИ можно реально определить тенденции развития экономики и социальной сферы региона и наметить пути управления развитием и ЭБ данного региона. Основным фактором уменьшения (не появления) угроз ЭБР является ее самодостаточность. Особое значение имеет реализация установок региональной политики в России, которая постоянно опаздывает за развитием негативных тенденций и угроз, регулярно возникающих в регионах страны.

**Угрозы ЭБР** можно классифицировать по группам (внутренние и внешние угрозы), которые приведены в табл. 2. Уровень ЭБ можно определить как некий иерархический атрибут, который может быть отображен в массиве ИР и обозначать степень его безопасности в реальном масштабе времени. Он соответствует определенному процессу (обнаружение, распознавание, локализация, ликвидация, восстановление функций ЭБР и компенсация ущерба), зависящему от проектных и штатных угроз.

Таблица 2. Угрозы экономической безопасности региона

Внутренние угрозы		Внешние угрозы	
Производство	Социальная сфера	Экономические	Политические
<ul style="list-style-type: none"> <li>- спад производства;</li> <li>- увеличение доли импортных товаров;</li> <li>- потеря квалифицированных кадров;</li> <li>- отсутствие заказов на выполнение НИОКР;</li> <li>- высокая степень изношенности основного оборудования.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- снижение уровня и качества жизни;</li> <li>- рост безработицы, особенно среди молодежи;</li> <li>- недостаток бюджетных средств;</li> <li>- деградация социальных учреждений;</li> <li>- имущественное расслоение населения.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- не рациональное использование валютных средств;</li> <li>- отток валютных средств;</li> <li>- потеря конкурентоспособности;</li> <li>- дискриминационные меры во внешней торговле;</li> <li>- зависимость от импорта продукции.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- потери внешнего рынка волевой продукции;</li> <li>- криминализация экономики;</li> <li>- отсутствие необходимых инвестиций;</li> <li>- конфликты между ветвями власти.</li> <li>- потери экспортных рынков сбыта продукции.</li> </ul>

Исследование уровня ЭБР базируется на большом числе показателей, которые имеют неодинаковую точность и объективность, зависящая от организации или лица, представляющего ЭИ. Данный вопрос достаточно подробно рассмотрен в [3].

**Особенности управления ЭБР.** Большое значение в социально-экономическом развитии общества, реализации экономических реформ и формирования рыночных отношений в России принадлежит регионам. Нижегородский регион со времен первого губернатора (Немцова Б.Е.) является полигоном и пионером проведения различных экономических реформ во многих сферах деятельности без должной оценки последствий результатов и влияния их на национальную и ЭБР. Проведение быстрой и с нарушениями приватизации и акционирование государственных предприятий, получение миллионных долларовых зарубежных займов, неоправданный импорт продуктов и товаров (аналогичных продукции, производимой Нижегородском регионе), отсутствие поддержки отечественного производителя (особенно в агропромышленном секторе и торговле), поддержка олигархических структур с преобладанием им режима наибольшего благоприятствия, расходование не по назначению бюджетных финансовых средств, скупка через подставных лиц и фирм контрольных пакетов акций ряда крупных бюджетобразующих предприятий, экономическое давление на предприятия посредством контроля за поставками сырья и рынками сбыта, благословение (коррупция) влиятельных государственных чиновников некоторым бизнесменам и другие показатели понижают уровень ЭБР.

Для Нижегородского региона экономика характеризуется следующими основными особенностями:

- существованием большого количества предприятий военно-промышленного комплекса, оказавшихся в достаточно тяжелой, особенно финансовой, ситуации;

- наличием энергоемких предприятий, при отсутствии самообеспеченности по собственнo вырабатываемой электроэнергии в регионе (необходимость получения ее из сетей ОАО «ФСК ЕЭС»);

- небольшая доля производимой продукции (промышленные и продовольственные товары) местными и российскими предприятиями для повседневных нужд населения (много не первосортного импорта);

- трудности поиска конкретных методов и способов реформирования региона из-за нечетко провозглашенных целей и борьбы административных и законодательных властей, конфликтующих между собой;

- нежелание подключать к реализации рыночных преобразований, имеющегося научно-технического потенциала региона;

- не принятие ответственности за проводимые рыночные реформы с федеральных структур на себя – местные органы власти;

- наличием высокого уровня безработицы (официально, 7% от трудоспособного населения);

- создание трудностей для малого и среднего бизнеса (оказание привилегий для крупного капитала: например, строительство огромных гипермаркетов на выгодных площадках).

Управление ЭБР возможно только при наличии объективной статистической информации, которая стекается в региональный Госкомстат. Экономическая информация состоит из многочисленных показателей функционирования и развития региона: данные об объеме и темпах роста валового внутреннего продукта (ВВП) и его структуре, развернутые данные по объемам и стоимости выпущенных товаров и предоставленных услуг, объемам производства, образования, распределение и использование доходов, капитальные затраты и другие показатели. Получаемые данные должны классифицироваться по секторам и отраслям. Подобные интегрированные данные нужны администрации региона, а также предпринимателям для анализа и прогноза социально-экономического развития региона и собственного бизнеса.

**Выводы.** Невозможно обеспечить достаточного уровня ЭБР без применения современных ИТ. Важным фактором в обеспечении и управлении ЭБР является обеспечение информационными ресурсами соответствующие органы управления региона, а также организация информационной безопасности, являющейся важнейшей составляющей управления состоянием экономической безопасности региона.

### Литература

1. **Экономическая и национальная** безопасность: Учебник / Под ред. Е.А. Олейникова. – М.: Изд-во «Экзамен», 2005. – 768 с.
2. **Экономическая безопасность России: Общий курс:** Учебник / Под ред. В.К. Сенчагова. – М.: Дело, 2005. – 896 с.

**3. Бармен Скотт.** Разработка правил информационной безопасности / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 208 с.

## **Моделирование теплового состояния секционированного объема с индивидуальными источниками теплоты в секциях**

Целью настоящего исследования является математическое моделирование распределения температур по секциям замкнутого объема при наличии теплообмена между секциями и окружающей средой с индивидуальными источниками теплоты в каждой секции. Приложением моделирования является, например, тепловой режим жилого или производственного здания с индивидуальными системами отопления в отдельных помещениях. Модель построена на основе теории многомерных цепей Маркова. Рассматривается некоторая совокупность прямоугольных ячеек в общем случае разного объема и разной ограничивающей их поверхности. Тепловые перетоки между ячейками описаны переходной матрицей для теплоты, элементы которой определяются условиями теплопередачи между секциями. Показано, что переходная матрица для температуры является транспонированной матрицей для теплоты. Теплоотдача в окружающую среду через ограничивающую объем поверхность, а также теплоподвод от источников в ячейках описаны через матрицы источников, которые описывают возрастание или убывание теплоты в ячейках на каждом временном переходе. В модели рассмотрены два приближения. В первом из них считается, что теплоаккумулирующая способность перегородок и ограждающих стенок невелика и время переходного процесса в них (установления стационарного распределения температуры) много меньше характерного времени других переходных процессов. Другое приближение учитывает тепловую инерцию стенок, что значительно повышает размерность модели, но делает ее более адекватной. Модель позволяет описывать переходные процессы в системе и рассчитывать ее установившееся тепловое состояние.

Численные эксперименты, выполненные с этой моделью, позволили качественно смоделировать ряд практически важных для теплоснабжения и энергосбережения ситуаций. В частности, модель позволяет рассчитать программу изменения мощности теплового источника, обеспечивающую заданный интервал температуры (или заданную программу ее изменения) в секции при изменении температуры окружающей среды, оценить, насколько в данной секции может быть использована мощность тепловых источников в других секциях. Она также позволяет поставить и решить некоторые оптимизационные задачи теплоснабжения, а также прогнозировать тепловое состояние объекта при случайном (аварийном) изменении ее характеристик.

## Цепные математические модели волновых процессов в протяженных заземлителях

В качестве протяженных заземлителей в настоящей работе рассматриваются электроэнергетические объекты двух типов: заземленные защитные тросы, подвешенные в воздухе параллельно поверхности земли, и проводящие трубы или стержни, проложенные в грунте параллельно (горизонтальный заземлитель) или перпендикулярно (вертикальный заземлитель) границе раздела воздух-грунт.

Целью проведенного исследования является разработка моделей в форме цепей с распределенными параметрами, волновые процессы в которых подобны аналогичным процессам в реальных заземлителях.

Формально эта задача сводится к сравнительному анализу уравнения для тока в заземлителе и телеграфного уравнения для тока в длинной линии, параметры которой должны быть установлены в ходе сравнения.

Основой для электромагнитного (ЭМ) поля цилиндрического заземлителя является ТМ- волна [1], относительно напряженности  $H_v$  которой из уравнений Максвелла можем записать

$$\frac{\partial^2 H_v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial r} \left( \frac{H_v}{r} \right) + \frac{\partial^2 H_v}{\partial x^2} = \mu_a \varepsilon_a \frac{\partial^2 H_v}{\partial t^2} + \frac{\mu_a}{\rho} \frac{\partial H_v}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_a$ ,  $\mu_a$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды,  $\rho$  – ее удельное сопротивление.

В работах [2, 3] при решении уравнений типа (1) было установлено, что для реальных заземлителей и сред вплоть до частот  $\omega \sim 10^8$  1/с справедливо неравенство  $ma \ll 1$  ( $m$  – электромагнитный параметр волнового процесса,  $a$  – радиус заземлителя), в силу чего у поверхности заземлителя имеем  $H_v \approx \frac{c}{r} = \frac{i(x, t)}{2\pi r}$ .

Подставляя это соотношение в (1) получаем уравнение для тока  $i = i(x, t)$  в заземлителе

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \mu_a \varepsilon_a \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{\mu_a}{\rho} \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (2)$$

Телеграфное уравнение для тока в линии имеет вид

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (L_0 g_0 + C_0 r_0) \frac{\partial i}{\partial t} + r_0 g_0 i, \quad (3)$$

В статье [3] на основе строгого решения задачи об ЭМ поле заземлителя были записаны формулы для  $r_0$ ,  $L_0$ ,  $g_0$ ,  $C_0$  в случаях прокладки горизонтального заземлителя как в грунте, так и в воздухе. Однако, расчет параметров цепи по ним возможен лишь после определения постоянной распространения. Аналогичным образом решается задача о параметрах цепной модели вертикального заземлителя [2].

Установим критерии, позволяющие рассчитать параметры модели через параметры среды, и запишем соответствующие соотношения.

Используя подстановку  $i(x, t) = e^{-\lambda t} v(x, t)$  приводим уравнения (2) и (3) к виду

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \delta^2 v, \quad (4)$$

причем для заземлителя имеем

$$a_s^2 = \frac{1}{\mu_a \varepsilon_a}, \quad \delta_s = \frac{1}{2\rho \varepsilon_a}, \quad \lambda_s = \delta_s; \quad (5)$$

для цепи с распределенными параметрами

$$a_m^2 = \frac{1}{L_0 C_0}, \quad \delta_m = \frac{L_0 g_0 - r_0 C_0}{2L_0 C_0}, \quad \lambda_m = \frac{L_0 g_0 + r_0 C_0}{2L_0 C_0}; \quad (6)$$

Волновые процессы для относительного тока  $i^* = i/i_0$  ( $i_0$  – базисный ток) в заземлителе и его модели (цепи с распределенными параметрами) будут тождественны при их описании уравнением

$$\frac{\partial^2 v(x^*, t^*)}{\partial t^{*2}} = \frac{a^2 t_0^2}{x_0^2} \frac{\partial^2 v(x^*, t^*)}{\partial x^{*2}} + \delta^2 t_0^2 v(x^*, t^*), \quad (7)$$

при выполнении условий

$$\frac{a^2 t_0^2}{x_0^2} = idem, \quad \delta^2 t_0^2 = idem \text{ или } \lambda t_0 = idem; \quad (8)$$

При одинаковом для заземлителя и модели масштабах длины и времени получаем следующие соотношения между параметрами

$$L_0 C_0 = \mu_a \varepsilon_a, \quad \frac{1}{2\rho \varepsilon_a} = \frac{L_0 g_0 - r_0 C_0}{2L_0 C_0}, \quad \frac{1}{2\rho \varepsilon_a} = \frac{L_0 g_0 + r_0 C_0}{2L_0 C_0}. \quad (9)$$

Второе и третье равенства совместны лишь при  $r_0=0$ , т.е. модель не имеет продольного активного сопротивления. Для остальных ее параметров имеем

$$L_0 C_0 = \mu_a \varepsilon_a, \quad \frac{g_0}{C_0} = \frac{1}{\rho \varepsilon_a}, \quad L_0 g_0 = \frac{\mu_a}{\rho}. \quad (10)$$

В качестве дополнительного соотношения, позволяющего однозначно вычислить значения искоемых параметров модели, целесообразно использовать известное уравнение Е.Д. Зунде [4] для вещественной составляющей переходного сопротивления  $R_{II} = 1/g_0$ .

Можно показать, что для троса (прокладка заземлителя в воздухе) следует принять в (9)  $g_0=0$ . В этом случае  $\lambda = \frac{r_0}{2L_0}$ ,

$$L_0 C_0 = \mu_a \varepsilon_a, \quad \frac{r_0}{C_0} = \frac{1}{\rho \varepsilon_a} \text{ или } r_0 C_0 = \frac{\mu_a}{\rho}. \quad (11)$$

Дополнительным соотношением является, как установлено в [3], формула электростатики для емкости цилиндрического провода у земли –  $C_0$ .

Таким образом цепные модели, адекватные ТМ-волне электромагнитного поля заземлителя содержат три первичных параметра. Для троса это  $r_0$ ,  $L_0$  – продольные параметры и  $C_0$  – поперечный параметр; для заземлителя в грунте – один продольный параметр –  $L_0$  и два поперечных –  $g_0$ ,  $C_0$ , причем в обоих случаях должны использоваться эффективные параметры, учитывающие условия прокладки.

Модели с двумя параметрами, например, модель с  $L_0$ ,  $g_0$ , предложенная в [5], хотя и позволяет ценить частотные свойства заземлителей, для исследования волновых процессов в них непригодны.

### Литература

1. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – С. 539.
2. Слышалов В.К., Голов П.В., Киселева Ю.А., Тимофеева И.В. Полевая и цепная модели волновых процессов в протяженном заземлителе // Вестник ИГЭУ, вып. 5. – Иваново, 2004. – С. 3-12.
3. 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.
4. Sunde E.D. Currents and Potentials Along Leaky Ground – Return Conductors – Electrical Engineering, 1936, December (12).
5. Базуткин В.В., Борисов Р.К., Горшков А.В., Колечицкий Е.С. Оценка параметров заземлителей при воздействии импульсных токов. – Электричество. – 2002. – № 6. – С. 6-12.



## **МАТЕРИАЛЫ**

Международной научно-технической конференции  
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**  
(XIII Бенардосовские чтения)

***18-20 октября***

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать 28.09.2006. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 14,01. Уч.-изд. л. 15,1. Тираж 170 экз. Заказ .

Ивановский государственный энергетический университет  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.