

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

СБОРНИК ТРУДОВ ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ ИГЭУ

Иваново 2018

Сборник трудов ведущих ученых ИГЭУ / Иван. гос. энерг. ун-т. –
Иваново, 2018.

Сборник трудов ведущих ученых ИГЭУ 2018-19 учебный год.

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора В.В. Тютикова

Отпечатано с оригиналов, представленных авторами.

©ФГБОУВО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина», 2018

Производство тепловой энергии при ее транспортировке в системах централизованного теплоснабжения

Высокие значения линейных потерь тепловой энергии в централизованных системах теплоснабжения обусловлены в настоящее время моральным и физическим износом тепловых сетей. Очевидными шагами в решении задачи повышения энергетической эффективности транспортировки тепловой энергии являются сокращение тепловых потерь, их локализация или возврат в систему теплоснабжения.

Исследуемое в работе устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы представляет собой пароконденсационный трансформатор теплоты с винтовым спиральным коллектором, воспринимающим линейные тепловые потери от трубопроводов тепловой сети системы теплоснабжения.

Получение эффекта от применения устройства достигается тем, что низкопотенциальный поток тепловой энергии от сети централизованного теплоснабжения в количестве, не превышающем нормируемые тепловые потери с единицы длины теплотрассы, направляется при помощи горизонтального винтового спирального коллектора в испаритель теплового насоса. Для этого организован контур циркуляции промежуточного теплоносителя между винтовым спиральным коллектором и испарителем теплового насоса.

В этой связи важным условием работы устройства является организация режима отбора теплоты от сети таким образом, чтобы, с одной стороны, ограничить его допустимым значением теплового потока [1], а с другой стороны, обеспечить отбор, необходимый для эффективной работы теплового насоса. Возможным вариантом разрешения этой дилеммы является локализация рассеивания тепловой энергии внутри канала теплотрассы размещением в ней теплоотражающих экранов, что позволит исключить нежелательное вторжение в процесс транспортировки теплоносителя в сети [2].

Для проведения натурных испытаний предлагаемого устройства разработана экспериментальная установка, конструкция которой показана на рис. 1. На рисунке так же показаны предполагаемые места замера температуры и теплового потока.

В задачу экспериментального исследования входит определение зависимостей тепловосприятия коллектора от его диаметра D , шага S , удаленности от поверхности изоляции трубопроводов d , заданной величины теплового потока q , расхода теплоносителя в коллекторе G , коэффициента теплопередачи коллектора λ_k , а так же места расположения и количества теплоотражающих экранов, которые необходимы для окончательного построения математической модели и разработки

практически значимых инженерных уравнений. Вышеперечисленные величины (рис. 2) являются параметрами оптимизации для планирования многофакторного эксперимента:

$$q_k = f(D, S, d, q, G, \lambda_k),$$

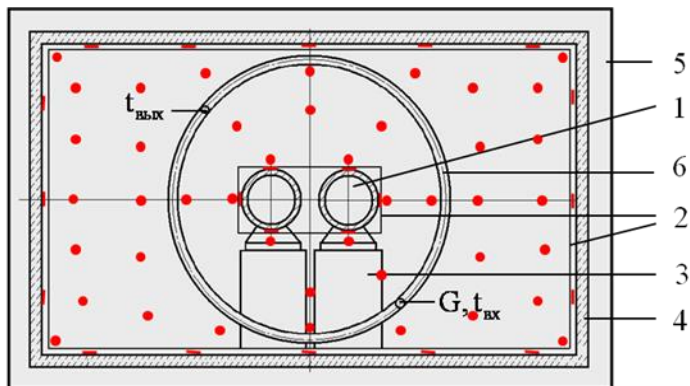


Рис. 1. Конструкция экспериментальной установки: 1 – источник тепловой энергии мощностью 0–300 Вт/м; 2 – теплоотражающие экраны; 3 – опора; 4 – корпус канала из органического стекла; 5 – климатическая камера; 6 – коллектор

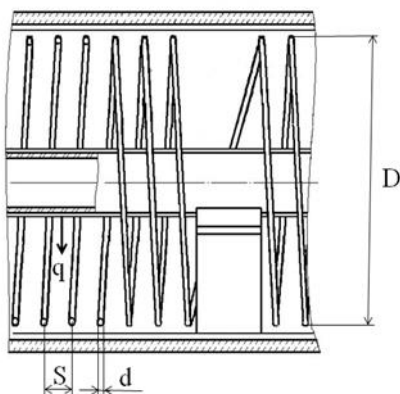


Рис. 2. Продольный разрез устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

В основу математического описания сложного радиационно-конвективного теплообмена положен принцип суперпозиции. Исходными уравнениями являются уравнения радиационного и конвективного теплообмена и соответствующие граничные условия.

Процесс конвективного теплообмена управляется основными законами сохранения массы, количества движения и энергии, определяющими поле температур в потоке и, следовательно, тепловые потоки [3].

Уравнение движения выглядит следующим образом

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = g\beta(t - t_a) \sin\left(\frac{x}{R}\right) + \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}.$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0.$$

Уравнение энергии, выведенное на основе закона сохранения

$$V_x \frac{\partial t}{\partial x} + V_y \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial y^2},$$

где V_x, V_y – компоненты вектора скорости; g – величина силы тяжести на единицу массы жидкости; β – коэффициент теплового объемного расширения жидкости; t_a – температура окружающей среды; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости; α – коэффициент температуропроводности жидкости.

Граничные условия имеют следующий вид

$$V_x = V_y = 0, \quad t = t_s(x) \quad \text{или} \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = q_s(x) \quad \text{при} \quad y = 0;$$

$$V_x \rightarrow 0, \quad t \rightarrow t_a \quad \text{при} \quad y \rightarrow \infty,$$

где $q_s(x)$ – заданный тепловой поток на поверхности; λ – коэффициент теплопроводности; t_s – температура на поверхности.

Вышеприведенные уравнения относятся к системе координат, представленной на рис. 3.

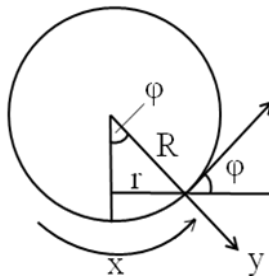


Рис. 3. Система координат для исследования естественной конвекции около горизонтального цилиндра

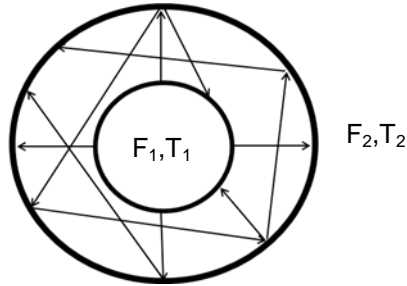


Рис. 4. Система лучистого взаимодействия тел

Особенностью теплообмена излучением является то, что излучающее тело полностью окружено поверхностью другого, как показано на рис. 4 [4]. При этом вся излучаемая центральным телом энергия падает на внешнее тело, но излучение внешней поверхности только частично падает на центральное тело, а остальная часть излучения снова попадает на ту же поверхность. Расчетная формула для расчета результирующего теплового потока между телами для такой системы выглядит следующим образом

$$Q = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; F_1 – расчетная поверхность теплообмена излучающего тела; T_1, T_2 – температуры тел; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

Отметим особенности применения предлагаемого устройства, которые заключаются в:

- ✓ утилизации неизбежных регламентированных тепловых потерь тепловой сети;
- ✓ локализации рассеивания тепловой энергии внутри канала теплотрассы;
- ✓ снижении потерь тепловой энергии от канала теплотрассы;
- ✓ возможности прогрева теплотрассы в зоне расположения коллектора на случай критических аварийных ситуаций в холодное время года;
- ✓ возможности бесконтактного точечного подсоединения потребителя тепловой энергии;

✓ надежности и экономичности работы теплового насоса за счет стабильных условий работы коллектора в области положительных температур.

Подводя итоги проделанной работы, отметим, что на сегодняшний день выполнена обзорная часть диссертации, обоснована тема работы, ее актуальность и практическое значение, поставлена цель и задачи исследования; проведен анализ энергетической и экономической эффективности предлагаемого в работе оригинального технического решения по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, сформулирована постановка задачи математического моделирования и определена базовая система дифференциальных уравнений исследуемого процесса теплообмена, разработана экспериментальная установка и методика проведения эксперимента, получено 3 патента и подана одна заявка на полезную модель.

Список литературы

1. **СНИП 41-03-2003.** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 22 с.
2. **Захаров В.М., Банникова С.А.** Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель РФ № 103175, 2011 г.
3. **Джалурия Й.** Естественная конвекция: тепло- и массообмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
4. **Болгарский А.В.** Термодинамика и теплопередача: учебн. для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1975.

Н.Н. Смирнов, ст. преп., В.М. Захаров, канд. техн. наук
(кафедра промышленной теплоэнергетики)

Снижение тепловых потерь в тепловых каналах и через ограждающие конструкции зданий за счет применения теплоотражающих экранов

В рамках гранта на выполнение научных исследований в 2011 году производились работы в двух направлениях, а именно:

- в развитие темы о применении теплоотражающих экранов в окнах было решено исследовать энергетическую эффективность жалюзи, представленных на современном рынке данного вида продукции, а также произвести экономическую оценку применения экранов и жалюзи на примере промышленного предприятия;

- было решено выяснить воздействие теплоотражающих экранов на снижение тепловых потерь в каналах теплотрассы.

Снижение тепловых потерь через окна за счет применения теплоотражающих экранов. В предприятии розничной торговли были закуплены эмалированные жалюзи, алюминиевые ламели которых по-

крыты краской и с одного опытного образца химическим и механическими путями было удалено лакокрасочное покрытие (рис. 1).



Рис. 1. Жалюзи очищенные (слева) и эмалированные (справа)

В ходе испытания эмалированного образца (табл. 1), проводившегося при $\alpha = +90^{\circ}$, мы получили увеличение сопротивления теплопередаче лишь на 12 % при установке его с внутренней стороны окна, а при испытании очищенных жалюзи, установленных также с внутренней стороны окна, – 37 %. Данный факт объясняется высокой степенью черноты краски, значение которой лежит в пределах 0,91–0,93, что в несколько раз превышает степень черноты алюминия, изменяющейся в пределах от 0,04 (полированный металл) до 0,2 (окисленный металл). Следовательно, в жалюзи с эмалированными ламелями, предлагаемыми отечественным и импортным производителями, за счет нанесения лакокрасочного покрытия значительно занижен энергосберегающий потенциал данной теплоотражающей конструкции.

Таблица 1. Результаты исследований эмалированных и очищенных алюминиевых жалюзи

Вид конструкции	Плотность теплового потока q , Вт/м ²	Приведенное термическое сопротивление, R , м ² ·°C/Вт	Увеличение приведенного термического сопротивления, %
Контрольный вариант	74,285	0,49	-
Эмалированные жалюзи	66,80	0,55	12 %
Очищенные жалюзи	54,71	0,67	37 %

Также в ходе работы была оценена экономическая эффективность применения теплоотражающих экранов. По результатам расчета срок окупаемости мероприятия составил 4 года, что является приемлемым, поскольку при реализации инвестиционных проектов в энергетике экономически целесообразный срок окупаемости принимается равным 7 годам.

Для объективной оценки экономической эффективности проведенных исследований был разработан проект установки предложенных оконных конструкций на производственном предприятии ОАО «Владимирский электроприбор» (г. Владимир). В результате выяснилось, что при применении оконного блока с установкой экрана снаружи и между стеклами годовые общие затраты предприятия сократятся на 188 тыс. рублей (при тарифах на тепловую энергию 1049,88 руб. за 1 Гкал, на электрическую энергию – 2811,9 руб. за 1 МВт·ч), что положительно повлияет на динамику развития производства. Также применение теплоотражающих экранов в окнах позволит обеспечить выполнение ФЗ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

Полученные результаты показали существенную годовую экономию тепловой (8–21 %) и электрической энергии (5–16 %) при использовании на промышленном предприятии ограждающих конструкций с «регулируемым» сопротивлением теплопередаче. Также был повышен уровень надежности функционирования систем теплоснабжения промышленных предприятий за счет снижения температуры теплоносителя в темный период суток.

Снижение тепловых потерь в тепловых сетях за счёт применения теплоотражающих экранов. Для уменьшения потерь тепла через оболочку канала тепловых сетей нами был предложен и запатентован способ локализации рассеивания тепловой энергии внутри канала теплотрассы при помощи установки на расстоянии 10 мм от стенок канала теплоотражающих экранов (рис. 2). В данном случае, в отличие от вышеуказанных теплоизоляционных конструкций, снижаются в большей степени потери от лучистой составляющей теплообмена за счет высокой отражательной способности экранов. Также за счет создания дополнительной воздушной прослойки уменьшаются и конвективные тепловые потери. Данная конструкция может использоваться в купе с вышеуказанными теплоизоляционными конструкциями, понижая температуру воздуха за экраном, и, тем самым, на внутренней поверхности стенки канала.

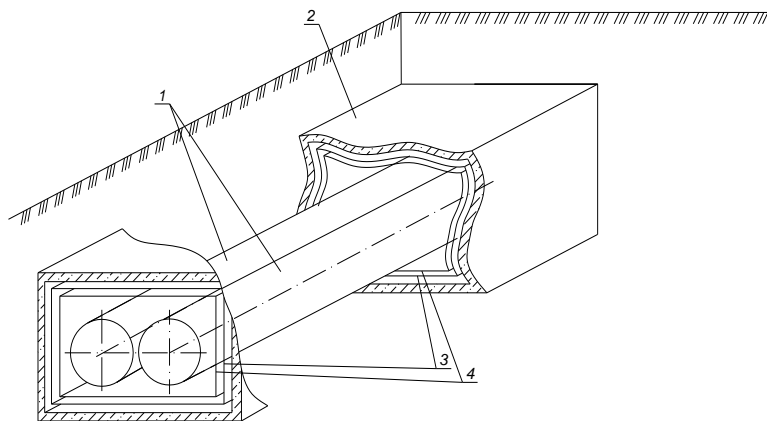


Рис. 2. Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: 1 – трубопровод тепловой сети; 2 – железобетонная оболочка канала; 3 – теплоотражающий экран; 4 – теплоотражающий экран

В лаборатории ТМО кафедры промышленной теплоэнергетики была создана экспериментальная установка, представляющая собой модель канала трубопровода тепловой сети с изоляцией (рис. 3). На ней были проведены исследования эффективности использования теплоотражающих экранов. Имитация стенки канала тепловых сетей производилась с помощью оболочки из оргстекла. В качестве теплоотражающих экранов использовалась алюминиевая фольга. В качестве тепловыделяющего элемента использовался ТЭН, причем температура на его поверхности регулировалась при помощи лабораторного трансформатора ЛАТР-1М путем изменения напряжения на наконечниках ТЭН. Электрический ток преобразовывался из переменного в постоянный с помощью выпрямителя. Электрическая мощность измерялась с помощью мультиметра Щ-4313, температуры – с помощью хромель-копелевых термомпар (в т.ч. дифференциальных), подключенных к измерителю-регулятору ИРТ-4 (данные переносятся на ЭВМ) и к милливольтметру Щ-300.

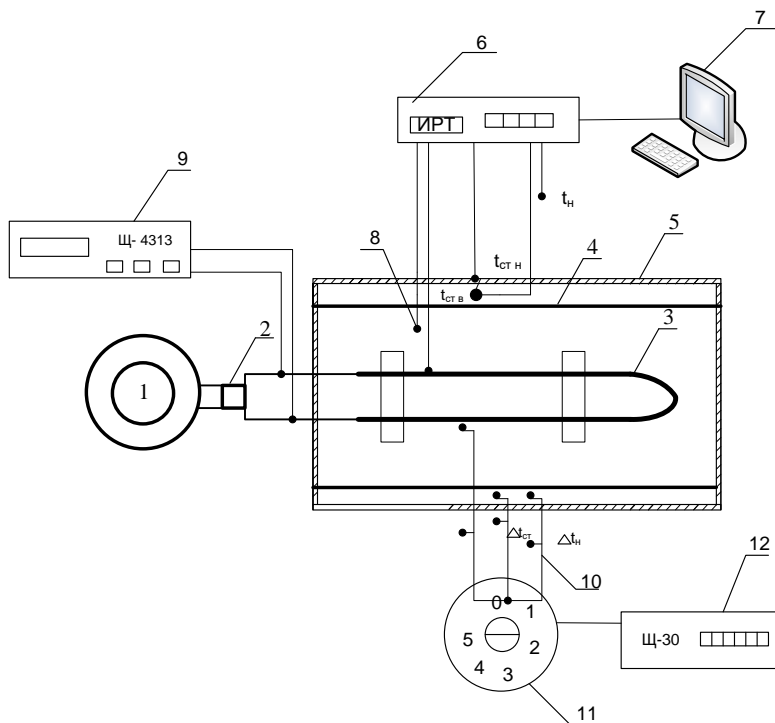


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – лабораторный автотрансформатор регулировочный ЛАТР-1М; 2 – выпрямитель; 3 – ТЭН; 4 – теплоотражающий экран; 5 – корпус канала из оргстекла; 6 – ИРТ-4; 7 – ЭВМ; 8 – хромель-копелевая термопара; 9 – мультиметр Щ-4313; 10 – дифференциальная термопара; 11 – переключатель каналов; 12 – милливольтметр Щ-30

В ходе проведения эксперимента были получены следующие данные.

Таблица 2. Результаты измерений температур

Измеряемые температуры *	Без экрана	С учетом экрана
$t_3, ^\circ\text{C}$	7,04	6,51
$t_4, ^\circ\text{C}$	9,62	7,93
$\Delta t_d, ^\circ\text{C}$	2,61	1,45

* t_3, t_4 – температуры на наружной и внутренней поверхностях оргстекла, измеренные хромель-копелевыми термопарами, $^\circ\text{C}$; Δt_d – разность температур, измеренная дифференциальными термопарами, $^\circ\text{C}$.

Таблица 3. Результаты расчета плотности теплового потока

Удельный (линейный) тепловой поток, Вт/м ²	Без учета экрана, (q ₁)	С учетом экрана, (q ₂)
q ₍₃₋₄₎ , Вт/м ²	103,2	56,8
q _(4а) , Вт/м ²	104,4	58

Таблица 4. Результаты расчета сопротивления теплопередаче

Сопротивление теплопередаче, м ² °С/Вт	Без учета экрана, (R ₁)	С учетом экрана, (R ₂)
R, м ² °С/Вт	0,34	0,60

Испытания, проведенные в лаборатории ТМО кафедры промышленной теплоэнергетики, показали, что применение теплоотражающих экранов в тепловых сетях снижает величину тепловых потерь на 44 % (с 104 Вт/м² до 57 Вт/м²) и увеличивает сопротивление теплопередаче на 0,26 м²°С/Вт.

Результаты работы. По итогам работы в рамках гранта на 2011 год было опубликовано 5 статей, 8 тезисов докладов. Было получено 2 патента на полезную модель. Данные разработки экспонировались на 3 выставках, в том числе на выставке «Энергосбережение и энергоэффективность-2011» (Москва, ВВЦ). По результатам исследований было сделано 12 докладов на конференциях международного, всероссийского и регионального уровня, в том числе на Ярославском энергетическом форуме (г. Ярославль), «Тинчуринские чтения» (г. Казань, КГЭУ). Вместе со студентами авторы приняли участие в 3 конкурсах НИР, в том числе «Эврика-2011» (НПИ, Новочеркасск), «Молодежные идеи и проекты, направленные на повышение энергоэффективности и энергосбережения» (г. Ярославль), и стали призерами во всех конкурсах.

Было получено 10 дипломов и 1 медаль.

А.Н. Белякова, докторант, А. В. Митрофанов, доцент
(кафедра промышленной теплоэнергетики)

Описание и совершенствование совмещенных процессов тепломассопереноса в сыпучих средах на основе уравнения Больцмана

Кинетическое уравнение Больцмана [1–4], описывающее статистическое распределение частиц в газе или жидкости, традиционно используется в теоретической физике для изучения переноса тепла и электрического заряда в жидкостях и газах. Например, из него выводятся транспортные свойства материалов, такие как электро-проводность, вязкость и теплопроводность.

В работе [4] предложена концепция моделирования совмещенных технологических процессов в сыпучих средах на основе уравнения Больцмана. В качестве искомой функции рассматривается плотность распределения вещества по координатам, скоростям и размерам в технологических аппаратах $f(\vec{r}, \vec{v}, \delta, t)$, где $\vec{r}(x_1, x_2, x_3)$ – радиус-вектор; $\vec{v}(v_1, v_2, v_3)$ – вектор скорости; δ – размер частицы; t – время. Произведение функции $f(\vec{r}, \vec{v}, \delta, t)$ на фазовый объем $dV = dx_1 dx_2 dx_3 dv_1 dv_2 dv_3 d\delta$ показывает вероятность в момент времени $(t, t + dt)$ частицы размером $(\delta, \delta + d\delta)$, находящейся в точке с координатами $(x_1, x_1 + dx_1)$, $(x_2, x_2 + dx_2)$, $(x_3, x_3 + dx_3)$, двигаться со скоростью $(v_1, v_1 + dv_1)$, $(v_2, v_2 + dv_2)$, $(v_3, v_3 + dv_3)$. В дифференциальной форме уравнение Больцмана для описания совмещенных процессов в сыпучих средах записывается в виде [4]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial v_k f}{\partial x_k} + \frac{\partial a_k f}{\partial v_k} = \dot{f}_c, \quad (k = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где $f(\vec{r}, \vec{v}, \delta, t)$ – искомая плотность распределения частиц по координатам $\vec{r}(x_1, x_2, x_3)$, скоростям $\vec{v}(v_1, v_2, v_3)$ и размерам частиц δ ; $\vec{a}(a_1, a_2, a_3)$ – ускорение частицы; \dot{f}_c – источниковый член уравнения, описывающий внешние потоки; повторение индекса «к» вверх и вниз дробки показывает суммирование по этому индексу.

За прошедший год в ходе работы по заявленной тематике на основе уравнения Больцмана сформулированы и решены следующие задачи тепломассопереноса в сыпучих средах [5–18]:

1. Движение материала [5–6].
2. Классификация порошка в гравитационном аппарате [7].
3. Классификация порошка в запыленном потоке [8].
4. Классификация и измельчение порошка в струйной мельнице кипящего слоя [9–12].
5. Тепломассоперенос в многофазных средах [13–16].
6. Разработка вычислительных алгоритмов и программных комплексов для расчета совмещенных процессов [6, 17, 18].

Все рассмотренные задачи нашли отражение в опубликованных или подготовленных к печати работах. Ниже основное внимание уделяется вопросам постановки задач и наиболее важным результатам, полученным в ходе их решения. Более детальный анализ решения проводится в опубликованных работах, на которые делаются соответствующие ссылки.

Задача 1. Движение материала.

Пригодность стохастического уравнения Больцмана для описания движения детерминированных объектов протестирована на примере «школьной» задачи: равноускоренное движение материальной точ-

ки. Частицы материала подаются в заданную точку вертикального канала с известной скоростью. Пренебрегая силой аэродинамического сопротивления и столкновениями частиц, движение частиц считаем равноускоренным

$$a = -g,$$

где a – ускорение частицы вдоль вертикальной оси z ; g – ускорение свободного падения. Аналитические выражения для закона движения и закона изменения скорости частиц в параметрическом виде (время t выступает в качестве параметра) имеют вид:

$$v = v_0 + at, z = z_0 + v_0 t + at^2/2,$$
 где нижний индекс «0» показывает

начальные значения скорости и координаты. Численное решение кинетического уравнения Больцмана (1) в одномерной постановке задачи при постоянном значении ускорения выполняется в соответствии с разработанным подходом [5–6]. В результате решения уравнения находятся распределения вещества по выделенным фазовым координатам для различных моментов времени. Для сопоставления полученных численных распределений с аналитическим детерминированным решением предварительно для численного решения определяются математические ожидания координаты и скорости частиц в разные моменты времени. Результаты расчетных исследований для частиц разной крупности приведены на рис. 1 в виде фазовых траекторий или зависимостей скорости частицы от ее координаты. Сопоставление аналитических (штриховая линия) и численных решений (точки) показывает удовлетворительное их совпадение, с одной стороны, и приемлемую точность численного метода решения уравнения Больцмана [6], с другой.

Задача 2. Классификация порошка в гравитационном аппарате.

Классификация порошка по крупности зерен рассматривается на примере гравитационного аппарата [7], выполненного в виде вертикального вентилируемого канала прямоугольного сечения. Классификация частиц по размерам обуславливается действием на частицу противоположно направленных сил: силы тяжести и силы сопротивления воздуха [19]. Мелкие частицы, для которых сила сопротивления существенно больше силы тяжести, уносятся из аппарата потоком воздуха. Более крупные частицы, для которых сила тяжести существенно больше силы сопротивления, покидают аппарат через нижний патрубок. Для построения модели классификации частиц в гравитационном аппарате на основе уравнения Больцмана необходимо задать вид поля ускорения или сил, действующих на частицу, в каждой точке рабочего объема. При определении ускорения частицы в гравитационном классификаторе приняты следующие допущения. Распределение плотности описывается вдоль одной геометрической координаты – вертикальной оси аппарата z , а в поперечном сечении аппарата материал идеально перемешивается. Рассматривается случай классификации при низкой концентрации твердой фазы в потоке, что позволяет не учитывать влияния взаимодействия частиц на процесс разделения. Ускорение части-

цы с учетом действия на частицу силы сопротивления (F_c) и силы тяжести (mg) находится из второго закона Ньютона

$$a = \frac{-gm + (F_c)_i}{m} = -g + \frac{k_f(w_0 - v)|(w_0 - v)|^{n-1}}{m}, \quad (2)$$

где m – масса частицы; w_0 – скорость воздуха в канале; коэффициент сопротивления (k_f) и параметр (n) определяются законом аэродинамического сопротивления [19]. Решение уравнения (1) с учетом (2) позволяет при известных начальных и граничных условиях определить искомую плотность распределения и необходимые технологические параметры процесса разделения [7].

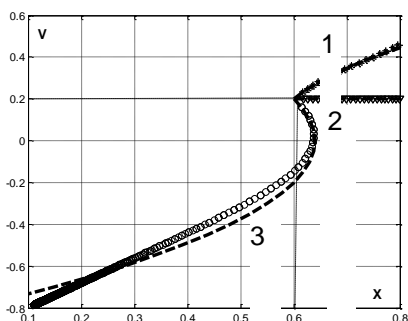


Рис. 1. Вид фазовых траекторий для мелких (1), крупных (3) и граничных (2) размеров частиц при их подаче в точку: $x_0 = 0,6$; $v_0 = 0,2$

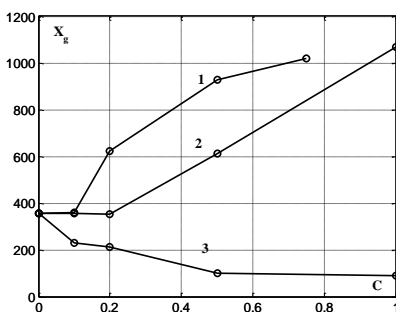


Рис. 2. Зависимость граничного размера (X_g , мкм) от концентрации твердой фазы (C , kg/m^3) для исходных продуктов с различными средними размерами зерен: 1 – 157; 2 – 455; 3 – 758 мкм

Задача 3. Классификация порошка в запыленном потоке.

В промышленных условиях при высокой концентрации твердой фазы в газовом потоке частицы сталкиваются друг с другом и с ограждающими стенками, что существенно влияет на показатели процесса классификации [19]. Для учета влияния концентрации частиц на процесс разделения в уравнение (2) вводится дополнительная сила взаимодействия (столкновения) частиц ($F_{\mu})_{ij}$ [8]. После этого выражение (2) записывается в виде:

$$\begin{aligned}
 a_i &= -g + \frac{(F_c)_i}{m_i} + \frac{(F_\mu)_{ij}}{m_i} = \\
 &= -g + \frac{k_f(w_0 - v)(w_0 - v)^{n-1}}{m} + \frac{3(1+k)(x_i + x_j)^2}{2(x_i^3 + x_j^3)}(v_i - v_j)|v_i - v_j|\beta(z, v, x_j)
 \end{aligned} \tag{4}$$

где β_j – объемная концентрация частиц j -го класса крупности в фазовом объеме; x – размер частиц; k – коэффициент восстановления скорости при ударе. Результаты решения уравнения (1) с учетом (4) приводятся на рис. 2 в виде зависимости граничного размера классификации от концентрации твердой фазы в аппарате при разной крупности зерен исходного порошка. Под граничным размером разделения [19] понимается размер частицы, вероятность попадания которой в тонкий продукт разделения равна пятидесяти процентам. Анализ результатов показывает, что значение граничного размера с ростом концентрации может как повышаться, так и понижаться, что соответствует известным результатам экспериментальных исследований [19].

Задача 4. Классификация и измельчение порошка в струйной мельнице кипящего слоя.

В струйных мельницах кипящего слоя [10, 21] процессы измельчения и классификации протекают совместно. Для описания измельчения материала в аппарате производится оценка энергии разрушения e_{ij} [10], которая в первом приближении принимается пропорциональной диссипации энергии при ударе частиц

$$e_{ij} = -\frac{3(1-k)(x_i + x_j)^2}{2(x_i^3 + x_j^3)}(v_i - v_j)|v_i - v_j|\beta(z, v, x_j)v\Delta t. \tag{5}$$

Известная величина энергии разрушения позволяет в рамках селективной модели разрушения [12, 20] описать измельчение, то есть вычислить распределение осколков по классам крупности. Найденные распределения вещества и энергии по фазовому пространству в виде изолиний в координатах x, v при разной высоте сечения аппарата z представлены на рис. 3. Расчетные распределения частиц по крупности после разрушения и классификации, определенные в рамках рассмотренной модели, показаны на рис. 4.

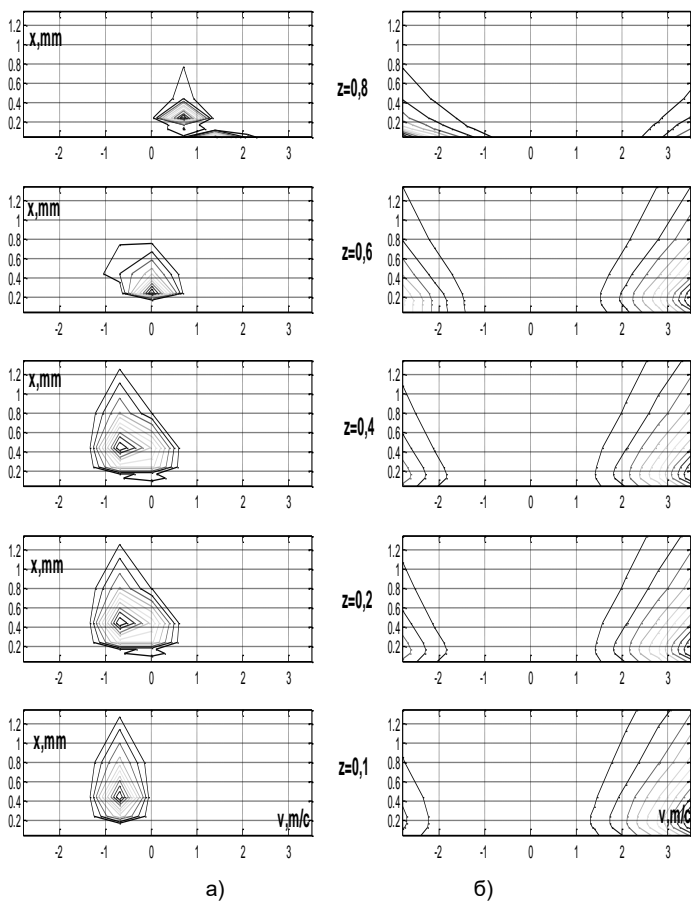


Рис. 3. Распределения вещества (а) и энергии (б) по фазовому пространству в виде изолиний в координатах x, v при разной высоте сечения аппарата z

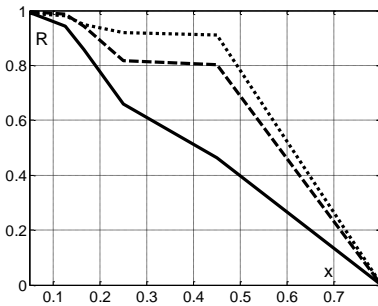


Рис. 4. Интегральное распределение материала по крупности в питании (пунктирная линия), в аппарате без учета разрушения (штриховая) и в аппарате с учетом разрушения материала (сплошная линия). $R(x)$ – остаток материала на контрольном сите размером x

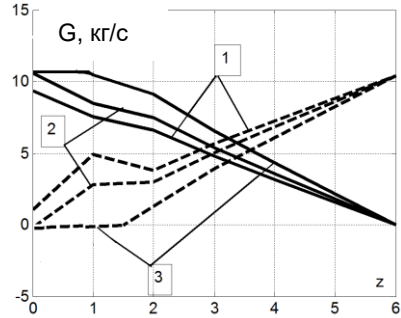


Рис. 5. Зависимость содержания пара (штриховая линия) и конденсата (сплошная линия) от номера ячейки по высоте конденсатора. Цифрами отмечены кривые, соответствующие разным значениям параметров идентификации модели

Задача 5. Тепломассообмен в многофазной среде при конденсации пара.

В целом ряде технологических установок процесс массообмена тесно связан с процессом теплообмена. В качестве примера можно привести конденсатор турбины, в котором на процесс теплообмена существенно влияет процесс массообмена между газом, растворенным в воде, и газом, содержащимся в паровой фазе [13–16]. Дальнейшее развитие предложенного подхода использования уравнения Больцмана для описания технологических совмещенных процессов позволило описать тепломассообмен в конденсаторе турбины. В качестве многофазной многопоточной среды рассматривается совокупность следующих потоков: циркуляционная (охлаждающая) вода; пар; конденсат пара; газ в паровой фазе и газ в жидкой фазе. В качестве искомой функции рассматривается плотность распределения вещества по выбранному фазовому пространству, структура которого для конденсатора турбины подробно обсуждается в [13]. С использованием предложенного метода проведены расчетно-экспериментальные исследования работы конденсатора турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ. На рис. 5 приведены результаты идентификации модели (1) по результатам экспериментальных испытаний (цифрами на рисунке отмечены кривые, которым соответствуют разные значения параметра идентификации). Расчетная кривая 3 на рис. 5 соответствует наблюдаемым в эксперименте значениям температуры теплоносителей [13].

Вычислительный метод решения уравнения Больцмана. Для численного решения уравнения Больцмана во всех задачах используется ячейечный подход, построенный на балансах энергии и массы в каждой ячейке фазового пространства. Искомая плотность распределе-

ния вещества по ячейкам представляется вектором $\mathbf{S} = \{S_i\}$, где индекс i соответствует номеру ячейки.

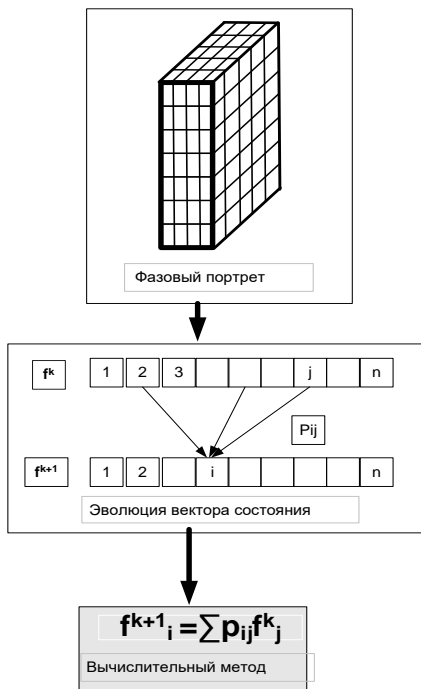


Рис. 6. Алгоритм построения модели эволюции состояния системы

торное выражение (рис. 6) по сравнению традиционным матричным описанием процессов [20] позволяет существенно экономить машинные ресурсы за счет исключения операций с нулевыми элементами. На программы, реализующие предложенный алгоритм, поданы заявки и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [6, 17, 18].

Постановка и решение ряда задач моделирования и расчета совмещенных процессов убедительно показали перспективность использования уравнения Больцмана для описания на единой методологической основе сложных технологических процессов.

Список литературы

1. Вулис Л.А. Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах. – М.: Атомиздат, 1971. – 384 с.
2. Веденяпин В.В. Кинетическое уравнение Больцмана и Власова. – М.: Физматлит, 2001. – 112 с.

Алгоритм расчета искомого распределения \mathbf{S} в произвольные моменты времени (k) представлен на рис. 6. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и материального балансов для определения потоков энергии или вещества между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить потоки вероятностей переходов (p_{ij}) за рассматриваемый промежуток времени Δt . Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов, определяется состояние системы в следующий момент времени. Предложенное для расчета опера-

3. **Kremer G.M.** An Introduction to the Boltzmann Equation and Transport Processes in Gases. – Springer-Verlag, Berlin, 2010.

4. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Моделирование и расчет совмещенных процессов на основе уравнения Больцмана // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2010. – Т. 53. – Вып. 11. – С. 114–117.

5. **Беляков А.Н, Жуков В.П., Otwinowski H.** Использование уравнения Больцмана для моделирования процесса гравитационной классификации в неоднородном газовом потоке // Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – Т. 2. – С. 322–325.

6. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах» №2010612671 от 19 апреля 2010 года / А.Н. Беляков, В.П. Жуков, А.А. Власюк, А.Е. Барочкин.

7. **Беляков А.Н, Жуков В.П.** Влияние режимных и конструктивных параметров на эффективность аэродинамической классификации // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2012. – Т. 55. – № 1. – С. 108–111.

8. **Беляков А.Н., Жуков В.П., Асташов Н.С.** Влияние концентрации твердой фазы на эффективность аэродинамической классификации // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2012. – Т. 55. – № 2 (принята к печати).

9. **Otwinowski H., Wyleciał T., Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Application of the boltzmann equation for the modelling of the comminution process in a ball mill // 1-st International Congress on Thermodynamics «Thermodynamics in Science and Technology». – Poland, Poznan, 2011. – Part 1. – P. 173–180. ISBN978-83-7775-038-4.

10. **Беляков А.Н., Жуков В.П., Otwinowski H., Urbaniak D.** Описание процессов измельчения и классификации сыпучих материалов на основе уравнения Больцмана // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 108–110.

11. **Беляков А.Н., Жуков В.П., Otwinowski H.** Формирование фракционных и энергетических потоков в струйных мельницах кипящего слоя // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1 (принята к печати).

12. **Беляков А.Н., Жуков В.П., Otwinowski H., Wyleciał T.** Стохастическое моделирование совмещенных процессов в ступенчатой мельнице кипящего слоя: сб. тр. XXIV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ24». – Киев, 2011. – Т. 9.

13. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н., Ледуховский Г.В.** Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде конденсатора турбины // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1 (принята к печати).

14. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н.** Структурная оптимизация многопоточных пластинчатых теплообменных аппаратов на основе генетического алгоритма // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 6. – С. 101–105.

15. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н.** Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 11. – С. 116–119.

16. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н.** Оптимизация позиционирования подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатых теплообменниках // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 68–70.

17. **Расчет** процессов тепломассообмена в многопоточных многоступенчатых аппаратах. Заявка №2011619561 от 14.12.2011 / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков.

18. Расчет процесса теплопроводности во вращающемся цилиндре при импульсном подводе теплоты. Заявка от 14.12.2011 / В.П. Жуков, А.Н. Беляков, П.В. Жуков.

19. Мизонов В.Е. Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.

20. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat. Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 с.

21. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering, – 2008. – P. 21.

Г.В. Ледуховский
(кафедра тепловых электрических станций)

Разработка фактических энергетических характеристик паровой турбины по результатам функциональных испытаний. Ч1

Актуальность работы. В настоящее время процессы производства и распределения электрической и, отчасти, тепловой энергии в России регулируются в рамках конкурентной среды. Такие условия стимулируют производителей энергии – электростанции и объединяющие их энергетические компании – к поиску путей сокращения издержек при производстве продукции. Эта цель предполагает постановку и решение ряда задач, охватывающих технологическое и конструктивное совершенствование генерирующего оборудования, совершенствование его эксплуатационных режимов, методов контроля технического состояния, характеристик экономичности, эффективности ремонтов и др.

Анализ опубликованных результатов исследований по оптимизации режимов работы оборудования ТЭС и опыта практического использования соответствующих программных комплексов позволяет заключить, что основой наиболее удачных оптимизационных программных комплексов являются математические модели системы (в данном случае – ТЭС), синтезируемые из математических моделей подсистем с декомпозицией до уровня отдельных энергетических агрегатов и технологических схем. Наиболее часто в качестве моделей отдельных агрегатов используются энергетические характеристики, поскольку эти характеристики входят в состав нормативно-технической документации по топливоиспользованию (НТД по ТИ), пересматриваемой и официально утверждаемой для каждой электростанции минимум один раз в пять лет, что обеспечивает определенную адекватность математической модели. Адекватность энергетических характеристик фактическим показателям работы оборудования зависит от наличия и качества проведения балансовых (функциональных) испытаний агрегатов, предшествующих разработке НТД по ТИ, и способа расчета собственно энергетических характеристик.

Таким образом, для достижения требуемой точности прогнозирования технико-экономических показателей при оптимизации режимов работы оборудования ТЭС необходимы математические модели отдельных агрегатов, адекватные его реальному техническому состоянию и условиям работы, что, в свою очередь, обеспечивается разработкой этих моделей по результатам натурных испытаний. Ниже приведено описание методики и показаны основные результаты испытаний турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп ПО ТМЗ Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, проведенных с целью разработки его фактических энергетических характеристик.

Объект испытаний. Паровая теплофикационная турбина Тп-115/125-130-1тп производства Уральского турбомоторного завода с регулируемым двухступенчатым теплофикационным и ограниченным регулируемым производственным отборами пара (рис. 1) предназначена для непосредственного привода электрического генератора переменного тока и отпуска пара на нужды производства и отопления. Турбина укомплектована синхронным электрическим генератором типа ТФП-110-2ЕУ номинальной активной мощностью 110 МВт с воздушным охлаждением. Турбоагрегат предназначен для замены отработавших ресурс теплофикационных турбин с использованием существующих ячеек в турбинных отделениях. Это обуславливает схемные и конструктивные отличия данной турбины от аналогичных теплофикационных турбин: турбина выполнена двухцилиндровой с ограниченной поверхностью охлаждения конденсатора и усеченной системой регенерации.

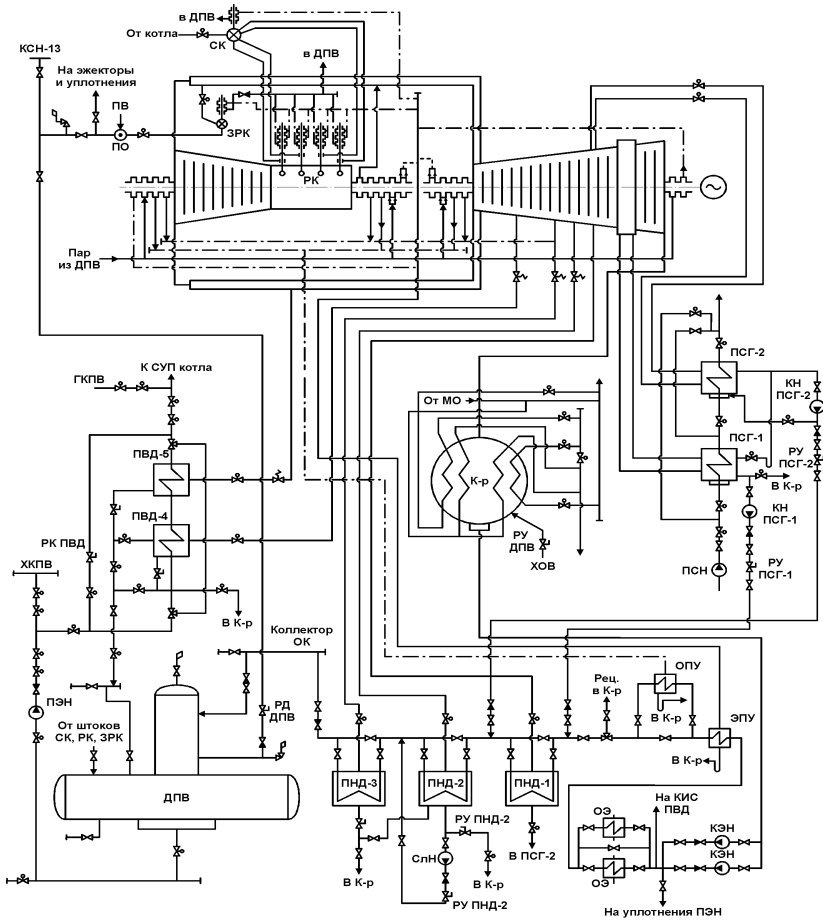


Рис. 1. Тепловая схема турбоагрегата: СК – стопорный клапан; ДПВ – деаэрактор питательной воды; ЗРК – защитно-регулирующий клапан; РК – регулирующий клапан; ПО – пароохладитель; ПВ – питательная вода; КСН-13 – коллектор пара производственных отборов; МО – маслоохладители; К-р – конденсатор; РУ – регулятор уровня; ХОВ – химически обессоленная вода; КЭН – конденсатный насос; ПЭН – питательный насос; ЭПУ – охладитель эжектора уплотнений; ОПУ – охладитель пара промежуточных камер концевых уплотнений турбоагрегата; Рец. – рециркуляция; ПНД и ПВД – регенеративные подогреватели соответственно низкого и высокого давления; КИС – клапан импульсный соленоидный; ОЭ – охладитель основного эжектора; ПСГ-1, 2 – соответственно нижний и верхний сетевые подогреватели; СлН – сливной насос; ОК – основной конденсат; РД – регулятор давления; ХКПВ и ГКПВ – соответственно холодный и горячий коллекторы питательной воды; РК ПВД – регулятор расхода воды через ПВД; СУП – сниженный узел питания; КН ПСГ-1 и КН ПСГ-2 – конденсатные насосы соответственно ПСГ-1 и ПСГ-2; ПСН – подкачивающий сетевой насос

Парораспределение цилиндра высокого давления сопловое, осуществляется четырьмя регулирующими клапанами. Парораспределение части низкого давления дроссельное, осуществляется регулирующей диафрагмой. Из проточной части, включающей 25 ступеней, предусмотрены следующие нерегулируемые отборы пара: на ПВД-5 – за 9 ступенью (выхлоп ЦВД), на ПВД-4 и деаэратор питательной воды – за 13 ступенью, на ПНД-3 – за 17 ступенью, на ПНД-2 – за 19 ступенью, на ПНД-1 – за 21 ступенью.

Конденсатор типа КГ1-3100 представляет собой один корпус от конденсатора турбоагрегата Т-100/120-130 ПО ТМЗ, подключенный к одностороннему выхлопу ЦНД. В составе конденсационной установки имеются охлаждаемые основным конденсатом теплообменники: охладители основных эжекторов и эжектора уплотнений, а также охладитель пара промежуточных камер концевых уплотнений турбоагрегата.

Регенеративная установка высокого давления включает группу из двух подогревателей высокого давления (ПВД) коллекторного типа, оборудованную регулируемым байпасом по питательной воде. Система регенерации низкого давления включает три подогревателя низкого давления (ПНД) поверхностного типа, причем ПНД-2 оборудован сливным насосом с закачкой конденсата греющего пара в трубопровод основного конденсата между ПНД-2 и ПНД-3. Деаэратор питательной воды в условиях Йошкар-Олинской ТЭЦ-2 обеспечивается греющим паром от стороннего источника – общестанционного коллектора пара производственных отборов турбин.

Схема слива конденсата греющего пара ПВД – типовая. Конденсат греющего пара ПНД-3 направлен в ПНД-2, откуда сливным насосом закачивается в трубопровод основного конденсата за ПНД-2. Для работы на малых нагрузках имеется возможность раздельного слива конденсата греющего пара ПНД-3 и ПНД-2 в расширитель дренажей турбины. Единственно возможной схемой слива конденсата греющего пара ПНД-1 является его слив в ПСГ-2, поэтому ПНД-1 может находиться в работе только в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды.

Ограниченный регулируемый производственный отбор пара осуществляется с выхлопа ЦВД. Регулирование давления в этом отборе предусмотрено в диапазоне от 12,0 до 18,0 кгс/см² и выполняется с помощью стопорно-регулирующего клапана, установленного непосредственно на трубопроводе отбора. Номинальный расход пара в производственный отбор составляет 70 т/ч.

Регулируемый теплофикационный отбор выполнен двухступенчатым. Отборы пара на подогреватели теплофикационной установки организованы из проточной части за 21 и 23 ступенями. Пределы регулирования давления: от 0,5 до 2,0 кгс/см² в нижнем теплофикационном отборе; от 0,6 до 2,5 кгс/см² в верхнем теплофикационном отборе. Регулирование давления осуществляется с помощью поворотной диафрагмы.

Теплофикационная установка рассматриваемого турбоагрегата идентичная теплофикационной установке турбоагрегата типа Т-100-130 и включает два сетевых подогревателя горизонтального типа. Слив конденсата греющего пара ПСГ-2 и ПСГ-1 раздельный с индивидуальными конденсатными насосами и подачей конденсата в линию основного конденсата соответственно до ПНД-2 и до ПНД-1. Также предусмотрен каскадный слив конденсата греющего пара ПСГ-2 в ПСГ-1.

Турбоагрегат Тп-115/125-130 является относительно новой разработкой Уральского турбомоторного завода и не получил еще широко распространения на электростанциях России. Опубликованные результаты его натуральных испытаний и типовая энергетическая характеристика отсутствуют, что существенно затрудняет разработку диаграмм режимов работы турбины, характеристик её экономичности и затрудняет эксплуатацию установки в целом.

Общие условия и метрологическое обеспечение испытаний.

В ходе испытаний, длившихся более ста часов, в девяноста двух опытах получены показатели, необходимые для построения характеристик по турбоустановке при ее работе в конденсационном режиме, теплофикационных режимах по тепловому и электрическому графикам нагрузки при одно- и двухступенчатом подогреве сетевой воды.

Перед проведением основных испытаний турбоагрегата были реализованы девять тарировочных опытов, целью которых являлось определение соответствия показаний расходомеров свежего пара и основного конденсата. В ходе этих опытов тепловая схема была максимально упрощена, в частности, отключены ПВД, теплофикационная установка, ПНД-1. Обработка результатов тарировочных опытов показала высокую сходимость материального баланса по турбоустановке в целом с максимальной величиной небаланса 0,6 %.

Основные опыты разделены на четыре группы:

1. Опыты по определению поправки к мощности турбоагрегата на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе (вакуумные испытания).

2. Группа опытов для построения диаграммы режимов работы турбины при работе в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды по тепловому и электрическому графикам нагрузок (режим «Т-2»).

3. Опыты для построения диаграммы режимов работы турбины при работе в теплофикационном режиме с одноступенчатым подогревом сетевой воды по тепловому и электрическому графикам нагрузок (режим «Т-1»).

4. Серия опытов для построения основных характеристик по турбоустановке при ее работе в конденсационном режиме (режим «К»).

Параметры режима работы элементов тепловой схемы турбоагрегата контролировались в ходе испытаний штатными приборами теплотехнического контроля, при этом большинство точек контроля дублировались для обеспечения точности результатов замеров совре-

менными высокоточными приборами, включая образцовые. Метрологическое обеспечение испытаний было разработано таким образом, чтобы обеспечить возможность определения показателей работы каждого элемента тепловой схемы и собственно турбоагрегата, а для наиболее важных параметров – измерение или косвенный расчет минимум двумя независимыми способами. В целом при испытаниях было организовано более ста точек контроля теплотехнических и электрических параметров, около половины измерений дублировалось. В ходе каждого опыта наиболее ответственные параметры контролировались с шагом по времени не более 40 секунд, второстепенные и мало изменяющиеся параметры – с шагом не более 80 секунд. За каждый опыт было получено от 9 до 38 первичных результатов замеров каждого параметра. Перед началом записи значений контролируемых параметров в опытах осуществлялась выдержка турбоагрегата на режиме длительностью от 30 до 45 минут для стабилизации теплового состояния оборудования.

Общие условия проведенных опытов (кроме вакуумных испытаний) характеризуются следующим: равенством расходов свежего пара на турбоагрегат и питательной воды через ПВД (расход питательной воды регулировался путем изменения степени открытия арматуры на трубопроводе за группой ПВД); поддержанием давления отработавшего пара в конденсаторе на уровне номинального значения путем изменения расхода охлаждающей воды через конденсатор; постоянством температуры обратной сетевой воды на входе в ПСГ-1 путем поддержания постоянной температуры прямой сетевой воды в коллекторах электростанции с использованием параллельно работающего турбоагрегата; поддержанием параметров свежего пара перед стопорным клапаном с минимальными отклонениями от номинальных значений; минимальными колебаниями уровней конденсата в конденсаторосборниках конденсатора, регенеративных и сетевых подогревателей.

Опыты при работе по тепловому графику нагрузок в режимах с одно- и двухступенчатым подогревом сетевой воды необходимы для построения основных зависимостей диаграмм режимов работы турбоагрегата. Такие опыты проводятся при закрытой регулирующей диафрагме ЧНД и минимальном пропуске пара в конденсатор. Однако для исследуемого турбоагрегата в ходе испытаний полного закрытия регулирующей диафрагмы ЧНД добиться не удалось, поскольку при степени открытия по указателю положения сервомотора менее 10 мм наблюдалось непрерывное увеличение разности температур металла выхлопного патрубка слева и справа, а также общий перегрев выхлопного патрубка, что недопустимо с точки зрения обеспечения безопасной эксплуатации турбоагрегатов. Таким образом была установлена минимально допустимая степень открытия регулирующей диафрагмы ЧНД, которая при отсутствии системы принудительного охлаждения выхлопного патрубка соответствует теплофикационным режимам работы по тепловому графику нагрузок.

Давление пара в камере верхней или нижней ступени теплофикационного отбора (в зависимости от исследуемого режима работы) при работе по тепловому графику нагрузок поддерживалось на заданных по условиям опытов уровнях за счет изменения расхода сетевой воды через сетевые подогреватели. При этом изменение расхода свежего пара на турбоагрегат обеспечивало изменение тепловой нагрузки теплофикационного отбора и электрической мощности турбогенератора.

Опыты при работе по электрическому графику нагрузок в режимах с одно- и двухступенчатым подогревом сетевой воды предназначены для определения коэффициента прироста электрической нагрузки при изменении тепловой нагрузки теплофикационного отбора пара, то есть для построения линий постоянной мощности на диаграммах режимов работы турбоагрегата. Такие опыты проводятся в несколько серий, каждая из которых характеризуется некоторым постоянным значением давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора. Каждая серия опытов при работе по электрическому графику нагрузок проведена при некотором постоянном значении расхода свежего пара на турбоагрегат. Изменение тепловой нагрузки теплофикационного отбора достигалось изменением расхода сетевой воды через сетевые подогреватели, а постоянство давления пара в камере верхнего теплофикационного отбора – изменением степени открытия регулирующей диафрагмы ЧНД.

Обработка результатов испытаний включала следующие этапы:

– первичную обработку результатов замеров и определение окончательных результатов измерения контролируемых параметров в опытах [1–3]. Первичные результаты замеров контролируемых параметров подвергнуты тестированию на выбеги с использованием критерия Кохрена и статистик Манделя, после чего выполнена оценка правильности результатов измерений [2] с исключением известных систематических погрешностей. Для предварительно обработанных таким образом результатов замеров выполнена проверка их приемлемости и установление окончательного результата измерений [3]. Поскольку утвержденные значения стандартных отклонений повторяемости, необходимые для проверки приемлемости результатов замеров, для большинства из используемых методов измерений не известны, были вычислены оценки стандартных отклонений повторяемости, характеризующие условия проведения всех опытов в целом. В зависимости от результатов проверки приемлемости, за окончательный результат измерения принималось либо среднее арифметическое значение, либо медиана всех результатов замеров конкретного параметра в опыте;

– сведение материальных балансов по турбоустановке. Выполнена проверка сходимости следующих материальных балансов в условиях каждого опыта (кроме вакуумных испытаний): баланса по расходу свежего пара относительно показаний расходомера основного конденсата за охладителем основного эжектора – баланса № 1; баланса по расходу свежего пара относительно расходомера основного конденсата

за регулятором уровня в конденсаторе – баланса № 2; баланса по расходу свежего пара относительно расходомера основного конденсата группой ПНД – баланса № 3; баланса системы основного конденсата между расходомерами за регулятором уровня и за группой ПНД – баланса № 4. Кроме окончательных результатов измерений контролируемых параметров в опытах, в балансовых расчетах использованы расходы пара с протечками по концевым уплотнениям турбоагрегата и уплотнениям штоков стопорного и регулирующих клапанов, определенные расчетным путем по фактическим зазорам в обоймах уплотнений [4]; расход с присосами охлаждающей воды в конденсаторе, определенный по результатам серии химических анализов проб свежего пара, основного конденсата и охлаждающей воды на жесткость общую и электропроводность; поправки к показаниям расходомеров свежего пара и основного конденсата, определенные в ходе обработки результатов тарировочных опытов. Расходы греющего пара на регенеративные и сетевые подогреватели определены по уравнениям их материальных и тепловых балансов при измеренных теплофизических параметрах теплоносителей в условиях каждого из опытов. Анализ результатов сведения балансов позволил заключить, что балансы № 1 и 2 сходятся в условиях опытов с максимальной невязкой 2,03 % (средняя по всем опытам невязка 0,23 %), а максимальная невязка баланса № 3 составляет 1,73 % (средняя по всем опытам невязка 0,04 %), что характеризует полученные результаты испытаний как допустимо точные;

– приведение результатов опытов к номинальным условиям. Поскольку условия проведения опытов несколько отличались друг от друга и от номинальных условий, выполнен расчет поправок, обеспечивающих учет отклонений фактических режимных параметров от их номинальных значений [4, 5]. Остановимся на этом этапе обработки результатов испытаний подробнее.

В качестве номинальной тепловой схемы выбрана тепловая схема, характеризующаяся следующим:

– все регенеративные подогреватели включены в работу; слив конденсата греющего пара ПНД-3 каскадный в ПНД-2 и далее сливным насосом в трубопровод основного конденсата за ПНД-2; слив конденсата ПНД-1 самотечный в ПСГ-2 (эти подогреватели включены в работу только в режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды);

– при абсолютном давлении в паровом пространстве ПВД-5 менее 0,9316 МПа ($9,5 \text{ кгс/см}^2$) слив конденсата ПВД-5 каскадный в ПВД-4, конденсат греющего пара ПВД-4 направляется в расширитель дренажей турбины; при абсолютном давлении пара в паровом пространстве ПВД-5 0,9316 МПа ($9,5 \text{ кгс/см}^2$) и более, а в паровом пространстве ПВД-4 менее 0,9316 МПа ($9,5 \text{ кгс/см}^2$) слив конденсата ПВД-5 каскадный в деаэрактор питательной воды, конденсат греющего пара ПВД-4 при этом направляется в расширитель дренажей турбины; при абсолютном давлении в паровом пространстве ПВД-4 0,9316 МПа

(9,5 кгс/см²) и более организуется каскадный слив конденсата греющего пара из ПВД-5 в ПВД-4 и далее в деаэрактор питательной воды;

- слив конденсата греющего пара ПСГ-2 (в режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды) – каскадный в ПСГ-1, слив конденсата греющего пара ПСГ-1 – конденсатным насосом в трубопровод основного конденсата до ПНД-1;

- снабжение деаэратора питательной воды паром от стороннего источника (коллектора пара производственных отборов турбин);

- ограниченный регулируемый производственный отбор отключен (подключение отбора учитывается соответствующими поправками к мощности, расходу свежего пара и удельному расходу тепла брутто на выработку электроэнергии);

- регулируемый байпас питательной воды помимо группы ПВД отключен.

В качестве номинальных с учетом существующих на ТЭЦ технических ограничений установлены следующие параметры: абсолютное давление свежего пара перед стопорным клапаном 12,553 МПа (128 кгс/см²); температура свежего пара перед стопорным клапаном 550 °С; абсолютное давление отработавшего пара в конденсаторе 0,004903 МПа (0,05 кгс/см²); абсолютное давление в деаэракторе питательной воды 0,588 МПа (6,0 кгс/см²); пределы регулирования абсолютного давления пара в производственном отборе – от 1,177 до 1,765 МПа (от 12,0 до 18,0 кгс/см²); пределы регулирования абсолютного давления пара в камере верхнего теплофикационного отбора – от 0,059 до 0,245 МПа (от 0,6 до 2,5 кгс/см²), в камере нижнего теплофикационного отбора – от 0,049 до 0,196 МПа (от 0,5 до 2,0 кгс/см²); температура обратной сетевой воды перед ПСГ-1 62,0 °С.

Исходя из требований заводов-изготовителей турбоагрегата и турбогенератора, учтены следующие ограничения по значениям параметров: максимальный расход свежего пара в режимах с тепловой нагрузкой 500 т/ч, в конденсационном режиме – 300 т/ч; максимальная электрическая мощность (ввиду установки турбогенератора непроектной марки) 121 МВт; номинальная тепловая нагрузка 209,34 МВт (180 Гкал/ч); максимальная тепловая нагрузка 238,42 МВт (205 Гкал/ч); максимальное абсолютное давление пара в камере регулирующей ступени 8,531 МПа (87 кгс/см²); максимальный расход пара в ЧНД 225 т/ч.

Приведение результатов опытов к номинальным условиям выполнено по методу постоянного расхода свежего пара [4, 5]. При этом для теплофикационного режима с двухступенчатым подогревом сетевой воды учтены следующие поправки на отклонение условий работы от номинальных:

- поправка к мощности на «схему», учитывающая изменение расходов пара в регенеративные отборы турбоагрегата при отклонении расхода питательной воды от расхода свежего пара и других схемных и режимных параметров работы технологических систем;

- поправка к мощности на отклонение фактического коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ турбогенератора от номинального значения $\cos(\varphi) = 0,8$;
- поправки к мощности на отклонение параметров свежего пара перед стопорным клапаном от номинальных значений;
- поправка к мощности на отклонение температуры обратной сетевой воды перед ПСГ-1 от номинального значения;
- поправка к мощности на отклонение фактического давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора от среднего по серии опытов;
- поправка к мощности на отклонение фактического давления пара в конденсаторе от номинального значения (для опытов при работе по электрическому графику нагрузок);
- поправка к мощности на отклонение фактического расхода свежего пара в каждом опыте от среднего по серии опытов (для опытов при работе по электрическому графику нагрузок).

Поправки к мощности на отклонение параметров свежего пара и температуры обратной сетевой воды определялись по данным завода-изготовителя турбоагрегата. Поправка к мощности на отклонение коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ рассчитывалась по характеристике электрических потерь турбогенератора. Поправка к мощности на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе определялась по полученной при обработке «вакуумных» опытов сетке поправок. Прочие поправки рассчитывались в условиях каждого из опытов согласно требованиям руководящих документов [4, 6].

Для теплофикационного режима с одноступенчатым подогревом сетевой воды отсутствует необходимость учета поправки к мощности на отклонение температуры обратной сетевой воды перед нижним сетевым подогревателем от номинального значения, поскольку эта поправка характеризует изменение внутренней мощности промежуточного отсека турбины только при двухступенчатом подогреве сетевой воды.

Для конденсационного режима требовалось учесть поправки на отклонение расходов теплоносителей по тепловой схеме, обусловленное отклонением значений ряда режимных параметров от номинальных условий; поправки на отклонение от номинальных значений коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ турбогенератора, параметров свежего пара перед стопорным клапаном, давления отработавшего пара в конденсаторе турбоагрегата.

Один из важнейших, с точки зрения расчета поправок к мощности, параметров – конечная энтальпия отработавшего пара на выходе из последней ступени турбоагрегата – определялся двумя способами: по энергетическому и материальному балансам проточной части турбоагрегата, а также по энергетическому и материальному балансам конденсатора. Средняя по всем опытам невязка определения энтальпии отработавшего пара указанными методами составила 0,59 %, по отдельным опытам эта невязка достигала 2 %. Для дальнейших расчетов принята

энтальпия отработавшего пара, определенная по балансам проточной части, поскольку такой способ является наиболее надежным [4].

Для теплофикационных режимов при работе по тепловому графику нагрузок дополнительно учитывалась поправка на тепловую нагрузку регулируемого теплофикационного отбора на отклонение фактического пропуска пара в ЧНД от номинального. Такая поправка оказалась необходимой, поскольку, как указано ранее, полного закрытия регулирующей диафрагмы в этих режимах добиться не удалось по условиям обеспечения нормального охлаждения выхлопного патрубка турбоагрегата. Остановимся на расчете рассматриваемой поправки подробнее.

В ходе обработки результатов испытаний выяснилось, что неполное закрытие регулирующей диафрагмы ЧНД в опытах при работе в режиме «Т-1» по тепловому графику нагрузок привело к появлению увеличенных, по сравнению с режимом «Т-2», разбросов опытных точек в нижнем квадранте диаграммы режимов. Анализ причин появления указанных разбросов позволил заключить, что частично открытая регулирующая диафрагма ЧНД, хотя ее сервомотор в режимах теплового графика и не был задействован в системе регулирования, допускала некоторые перемещения из-за наличия технологических люфтов в приводе. Это, в свою очередь, приводило к периодическим изменениям пропуска пара в ЧНД и, соответственно, к некоторому изменению электрической и тепловой нагрузок турбоагрегата.

Для режима «Т-2» эта особенность не привела к заметному ухудшению качества результатов испытаний, что, видимо, связано с меньшей неравномерностью потока пара перед регулирующей диафрагмой, чем в режиме «Т-1» и, соответственно, меньшими колебаниями регулирующей диафрагмы в опытах. Напротив, отключение верхнего теплофикационного отбора и передача всей тепловой нагрузки на нижний теплофикационный отбор, то есть переход из режима «Т-2» в режим «Т-1», увеличивала неравномерность поля скоростей пара в выходном сечении последней ступени промежуточного отсека, то есть перед регулирующей диафрагмой, что увеличивало и неравномерность динамического воздействия потока пара на нее.

Сделанный вывод подтверждает опытная зависимость пропуска пара в ЧНД от давления пара в камере нижнего теплофикационного отбора (рис. 2): опытные точки для режима «Т-2» ближе расположены к прямой, выходящей из начала координат (такая зависимость соответствует физической сущности процесса). Среднеквадратичное отклонение по опытным точкам режима «Т-2» составляет 0,3 т/ч, а по опытным точкам режима «Т-1» – 1,8 т/ч, то есть в шесть раз больше.

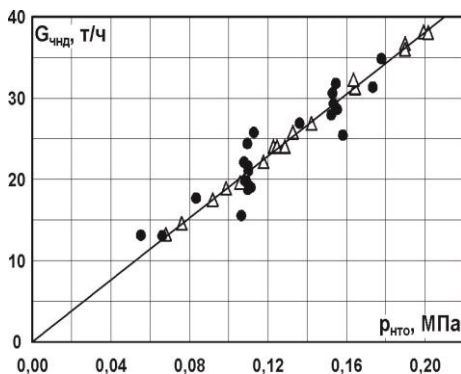


Рис. 2. Опытная зависимость расхода пара в ЧНД от давления пара в камере нижнего теплофикационного отбора в режимах работы по тепловому графику нагрузок: $G_{\text{чнд}}$, т/ч – расход пара в ЧНД; $p_{\text{нто}}$, МПа – абсолютное давление пара в камере нижнего теплофикационного отбора; • и Δ – опытные данные при работе в режимах соответственно «Т-1» и «Т-2»; линия – линейная аппроксимация опытных данных

Указанная особенность привела к необходимости расчета при обработке испытаний поправки к тепловой нагрузке регулируемого теплофикационного отбора ΔQ_T , Гкал/ч, на отклонение фактического пропуса пара в ЧНД от номинального:

$$\Delta Q_T = (G_{\text{чнд}} - G_{\text{чнд}}^{\text{ном}})(h_{\text{нто}} - h_{\text{кп}}^{\text{ПСГ-1}}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $G_{\text{чнд}}$, т/ч – расход пара в ЧНД в условиях опыта; $G_{\text{чнд}}^{\text{ном}}$, т/ч – то же, с приведением к номинальным условиям; $h_{\text{нто}}$, ккал/кг – энтальпия пара в камере нижнего теплофикационного отбора в условиях опыта; $h_{\text{кп}}^{\text{ПСГ-1}}$, ккал/кг – энтальпия конденсата греющего пара нижнего сетевого подогревателя (ПСГ-1) в условиях опыта. В качестве номинального расхода пара в ЧНД $G_{\text{чнд}}^{\text{ном}}$ в зависимости от давления пара перед регулирующей диафрагмой $p_{\text{нто}}$ в условиях опыта принята линейная аппроксимация опытных данных (рис. 2).

Рассчитанная таким образом поправка суммировалась с опытным значением тепловой нагрузки теплофикационного отбора, в результате чего определялась тепловая нагрузка в условиях опыта, приведенная к номинальным условиям, которая и использовалась при построении диаграммы режимов.

Вакуумные испытания. Давление отработавшего в турбине пара является одним из важнейших режимных параметров, существенно влияющим на экономичность работы турбоустановки в целом. Это влияние может быть выражено либо изменением вырабатываемой турбогенератором электрической мощности при постоянных значениях расхода свежего пара на турбину и тепловой нагрузки регулируемых отборов, либо изменением расхода свежего пара, необходимым для поддержания постоянной электрической и тепловой нагрузок при отклонении давления отработавшего пара в конденсаторе. Наиболее употребительным является первый способ учета рассматриваемой поправки.

Для турбоагрегатов различных типов изменение вырабатываемой электрической мощности при изменении давления отработавшего пара

на одну и ту же величину различно [7, 8]. Это обусловлено, главным образом, различием конструктивных характеристик проточной части низкого давления (ЧНД) турбины и связанных с ними различий в характере изменения внутреннего относительного КПД ЧНД при изменении объемных пропусков пара через нее. Например, при изменении давления отработавшего пара на 1 кПа усредненная поправка к электрической мощности для турбоагрегата типа ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ составляет 450 кВт, а для турбоагрегата типа Т-110/120-130 УТМЗ – 730 кВт.

Для конкретного турбоагрегата влияние давления отработавшего пара на вырабатываемую электрическую мощность неоднозначно при различных значениях расхода пара в конденсаторе. При учете технико-экономических показателей работы турбоагрегатов используют специальные характеристики, учитывающие эту неоднозначность. В качестве примера рассмотрим поправку к электрической мощности на отклонение давления пара в конденсаторе для турбоагрегата типа Т-100/120-130 УТМЗ [9] (рис. 3). Существует область (заклученная между линиями I – I и II – II на рис. 3), в которой вне зависимости от расхода пара в конденсатор (в данном случае расход пара в конденсатор равен расходу пара на входе в ЧНД) поправка к мощности одинакова при изменении давления пара в конденсаторе на одну и ту же величину. Эта область соответствует режимам с докритической скоростью истечения пара из рабочей решетки последней ступени турбоагрегата. В режимах со сверхкритическими скоростями истечения пара из рабочей решетки последней ступени изменение давления в конденсаторе на параметрах пара перед последней ступенью не сказывается. Мощность всех ступеней турбины, кроме последней, остается постоянной, а мощность турбины изменяется только за счет изменения окружной составляющей скорости выхода пара из рабочей решетки последней ступени. В таких условиях (в области ниже линии I – I на рис. 3) прямая зависимость между приращением теплоперепада и мощности нарушается. При очень высоком противодавлении (в области выше линии II – II на рис. 3) зависимость также имеет изгиб, объясняющийся снижением влияния режима последней ступени, на которой при высоких противодавлениях срабатывается очень малый тепловой перепад.

Порядок использования таких характеристик состоит в следующем. Предположим, необходимо определить изменение вырабатываемой турбоагрегатом электрической мощности при постоянном расходе пара в конденсатор (в ЧНД) при переходе от режима «А» к режиму «Б» (рис. 3). Для этого следует определить точки пересечения вертикалей, соответствующих значениям давления пара в конденсаторе для рассматриваемых режимов (p_2^A и p_2^B), с линией постоянного заданного расхода пара в конденсатор (точки «А» и «Б»). Разность между ординатами точек «А» и «Б» в соответствующем масштабе представляет собой изменение вырабатываемой электрической мощности. Учитывая, что при переходе от режима «А» к режиму «Б» в рассматриваемом примере давле-

ние пара в конденсаторе уменьшилось, поправка к мощности будет положительной, то есть электрическая мощность турбоагрегата увеличится.

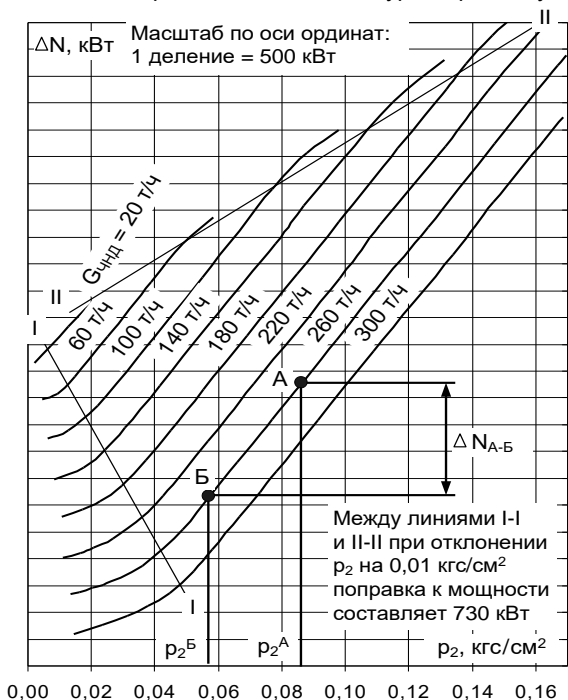


Рис. 3. Поправка к вырабатываемой электрической мощности турбоагрегата типа Т-100/120-130 УТМЗ на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе: ΔN , кВт, – поправка к мощности; p_2 , кг/см², – абсолютное давление пара в конденсаторе; $G_{\text{чнд}}$, т/ч, – расход пара на входе в ЧНД турбоагрегата

На практике для получения подобных графических зависимостей проводят специальные испытания турбины. Такие испытания и опыты, их составляющие, называются вакуумными.

Методика проведения и обработки результатов вакуумных испытаний паровых турбин предложена и проверена А.С. Зильберманом и М.А. Ухоботиним [5, 10]. Основная идея методики сводится к тому, чтобы исключить влияние на мощность турбоагрегата при проведении вакуумных опытов всех факторов, кроме искусственно изменяемого давления отработавшего пара. Для этого во время проведения вакуумных опытов отключается большинство регенеративных подогревателей и фиксируется положение органов парораспределения. Необходимо также максимально уменьшить колебания параметров свежего пара от опыта к опыту. Изменение давления отработавшего пара от опыта к опыту производится либо изменением расхода охлаждающей воды че-

рез конденсатор, либо впуском воздуха в вакуумную систему через пусковой эжектор конденсационной установки.

При такой организации испытаний обработка их результатов сводится к следующему [5, 10]:

– вводится поправка к мощности турбины на отклонение давления свежего пара. Поскольку органы парораспределения в вакуумных опытах фиксированы, отклонение начального давления от опыта к опыту ведет к изменению расхода свежего пара на турбину и, как следствие, к отклонению давления пара в контрольной ступени. Контрольная ступень для вакуумных опытов выбирается из условия, чтобы при отклонении давления пара в конденсаторе давление пара в камере этой ступени не изменялось. Обычно контрольной является ступень, предшествующая отбору пара на ПНД-2 или ПНД-3. Таким образом, отклонение давления свежего пара выражается поправкой на отклонение давления пара в контрольной ступени α_{PK} , %, рассчитываемой по выражению

$$\alpha_{PK} = \frac{p_k^H - p_k \sqrt{\frac{T_0^H}{T_0}}}{p_k \sqrt{\frac{T_0^H}{T_0}}} 100, \quad (2)$$

где p_k и p_k^H , кгс/см² – давление в контрольной ступени турбины в условиях опытов и принятое за номинальное (обычно в качестве номинального принимается среднее значение по серии опытов); T_0 и T_0^H , °С – абсолютная температура свежего пара в условиях опытов и номинальная;

– учитывается поправка к мощности на отклонение температуры свежего пара. При неподвижных органах парораспределения отклонение начальной температуры пара приводит к изменению расхода свежего пара и используемого теплоперепада турбины, причем эти отклонения имеют противоположные знаки. Тогда поправка к мощности, учитывающая отклонение начальной температуры пара α_{to} , %, может быть определена по выражению

$$\alpha_{to} = \left(\frac{\delta H_0}{H_0} - \frac{\delta G_0}{G_0} \right) (T_0^H - T_0), \quad (3)$$

где $\delta H_0/H_0$, %/°С – удельное изменение теплоперепада турбины при отклонении начальной температуры на 1 °С, с достаточной точностью определяемое путем построения ориентировочного процесса расширения пара в турбине в h_s -диаграмме; $\delta G_0/G_0$, %/°С – удельное изменение расхода свежего пара на турбину при отклонении начальной температуры на 1 °С, приблизительно определяемое через начальную абсолютную температуру пара в условиях опытов T_0 , К, как $100/(2T_0)$;

– по характеристике электрических потерь в генераторе рассчитывается поправка к мощности, обусловленная отклонением коэффи-

циента мощности генератора в условиях опытов от номинального значения, $\Delta N_{\cos(\varphi)}$, кВт;

– вводится поправка к давлению отработавшего пара в условиях опытов, обусловленная отклонением расхода свежего пара из-за отклонения начальных параметров пара перед турбиной:

$$\alpha_{P2} = \alpha_{PK} - \frac{100}{2T_0} (T_0^H - T_0) . \quad (4)$$

Пересчет измеренных в каждом опыте значений электрической мощности и давления отработавшего пара к номинальным условиям производится по формулам:

$$N_T^{np} = N_T \left(1 + \frac{\alpha_{PK} + \alpha_{to}}{100} \right) + \Delta N_{\cos(\varphi)} , \quad (5)$$

$$p_2^{np} = p_2 \left(1 + \frac{\alpha_{P2}}{100} \right) , \quad (6)$$

где N_T и N_T^{np} , кВт – активная электрическая нагрузка турбогенератора в условиях опытов и приведенная к номинальным условиям; p_2 и p_2^{np} , кгс/см² – абсолютное давление пара в конденсаторе в условиях опытов и приведенное к номинальным условиям.

Далее, принимая на начало отсчета опыт с минимальным давлением пара в конденсаторе, то есть с максимальной электрической мощностью $N_T^{np_0}$, кВт, можно определить изменение мощности турбины ΔN_i , кВт, вычитая из $N_T^{np_0}$ значение $N_T^{np_i}$ для каждого i -го опыта. В завершение расчета полученные значения ΔN_i и $p_2^{np_i}$ относятся к среднему по серии опытов расходу пара в часть низкого давления турбоагрегата $G_{чнд}$, т/ч. Таким образом, для каждого i -го опыта определяется пара отношений: $\Delta N_i / G_{чнд}$, кВт·ч/т, и $p_2^{np_i} / G_{чнд}$, кгс·ч/(т·см²).

По полученным данным в координатах $(\Delta N_i / G_{чнд}) - (p_2^{np_i} / G_{чнд})$ строится универсальная вакуумная кривая (рис. 4), которая затем пересчитывается в искомую сетку поправок к мощности турбины на отклонение давления отработавшего пара (рис. 4).

Из-за наличия технических ограничений, связанных с работой системы циркуляционного водоснабжения с градирнями, в испытаниях не удалось достичь абсолютного давления пара в конденсаторе менее 0,08 кгс/см², поэтому универсальная вакуумная кривая (рис. 4) в области, соответствующей $(\Delta N/G_{чнд}) < 0$, включая зону сверхкритического истечения пара из рабочей решетки последней ступени, построена на основании оценочного расчета последних ступеней ЧНД.

Полученная таким образом характеристика использована для расчета поправок к мощности турбоагрегата при обработке результатов основных опытов при работе в режимах «Т-2», «Т-1» и «К».

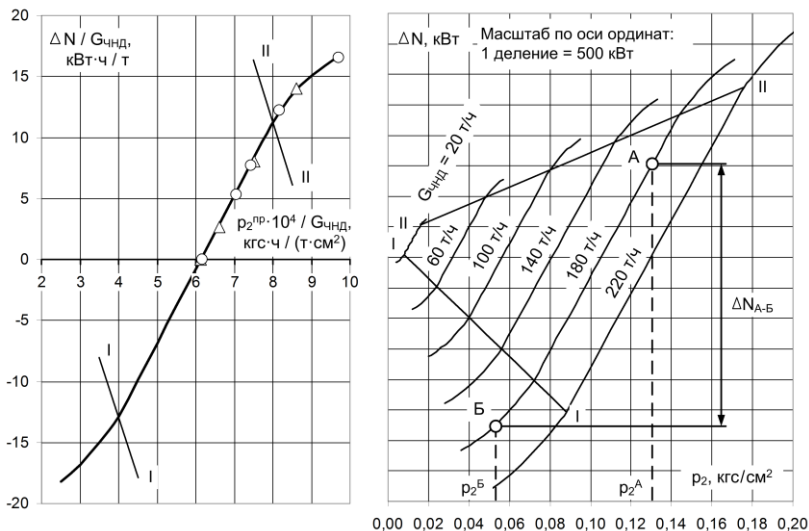


Рис. 4. Универсальная вакуумная кривая (слева) и поправка к вырабатываемой электрической мощности турбоагрегата на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе (справа): Δ – первая серия опытов; \circ – вторая серия опытов; I-I и II-II – граничные линии зоны эквидистантности; $\Delta N/G_{\text{Чнд}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, и $p_2^{\text{пр}}/G_{\text{Чнд}}, \text{ кгс}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{см}^2)$ – параметры универсальной вакуумной кривой; $\Delta N, \text{ кВт}$ – поправка к мощности; $p_2, \text{ кгс}/\text{см}^2$ – абсолютное давление пара в конденсаторе; $G_{\text{Чнд}}, \text{ т/ч}$ – расход пара в Чнд турбоагрегата

Сопоставление данных, представленных на рис. 3 и 4, косвенно подтверждает рекомендации специалистов Уральского турбомоторного завода относительно области применения турбоагрегатов типа Тп-115/125-130-1тп. Поскольку турбина выполнена с недостаточной поверхностью охлаждения конденсатора (для обеспечения возможности установки ее в существующие ячейки турбинных отделений электростанций) и неразвитой в сравнении с аналогичными турбинами проточной частью низкого давления, она не рассчитана на эффективную выработку электроэнергии по конденсационному циклу и позиционируется как турбина, предназначенная для обеспечения базовой части графиков тепловой нагрузки теплоэлектроцентралей.

Полученные экспериментальные данные характеризуют фактические условия и показатели работы исследуемого турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ. Разработанные диаграммы режимов и рассчитанные при их использовании энергетические характеристики предназначены для организации эксплуатации, оптимизации режимов и анализа технико-экономических показателей работы турбоагрегатов в ходе эксплуатации.

Список литературы

1. **ГОСТ 8.207-76.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. 15.03.1976. – М.: Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР; М.: Изд-во стандартов, 1976. – 11 с.
2. **ГОСТ Р ИСО 5725-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. В 6 ч. Ч. 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений: Р ИСО 5725-4-2002. – Введ. 23.04.02. – М.: Госстандарт России; М.: Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.
3. **ГОСТ Р ИСО 5725-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. В 6 ч. Ч. 6. Использование значений точности на практике: Р ИСО 5725-6-2002. – Введ. 23.04.02. – М.: Госстандарт России; М.: Изд-во стандартов, 2002. – 43 с.
4. **Методические** указания по тепловым испытаниям паровых турбин. МУ 34-70-093-84 (СО 34.30.740); разработ. ПО «Союзтехэнерго», утв. ПО «Союзтехэнерго» 21.12.84, введ. в действие с 01.01.85 г.
5. **Сахаров А.М.** Тепловые испытания паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
6. **РД 34.09.155-93.** Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: разработ. «Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС», утв. Министерством топлива и энергетики России 22.09.93, введ. в действие с 01.12.93.
7. **Теплообменники** энергетических установок: учеб. для вузов / К.Э. Аронсон и др.; под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Изд-во «Сократ», 2002. – 968 с.
8. **РД 34.30.501.** Методические указания по эксплуатации конденсационных установок паровых турбин электростанций: утв. Главным техническим управлением по эксплуатации энергосистем 04.06.1985: введ. в действие с 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 102 с.
9. **Типовая** энергетическая характеристика турбоагрегата Т-100/120-130-3 ТМЗ: утв. зам. начальника Глав. техн. управления по эксплуатации энергосистем Мин. энергетики и электрификации СССР. – М.: Служба передового опыта и информации Союзтехэнерго, 1984. – 64 с.
10. **Ухоботин М.А.** Испытание паровых турбогенераторов. – М.: Госэнергоиздат, 1952. – 96 с.

Е.Ю. Григорьев, А. Л. Виноградов
(кафедра паровых и газовых турбин)

Исследование влияния характера течения в кольцевых диффузорах газовых турбин на их вибрационное состояние

Основное отличие газовой турбины от паровой состоит в существенно меньшем располагаемом перепаде энтальпий на её проточную часть, т.к. за последней ступенью этой турбины давление выходящих газов оказывается близко к атмосферному и способы его снижения

крайне ограничены, практически для его снижения используют диффузорный эффект, суть которого сводится к преобразованию кинетической энергии потока, покидающего последнюю ступень турбины, в потенциальную энергию давления.

Для такого преобразования чаще всего используют геометрические диффузоры, представляющие собой каналы с непрерывно увеличивающейся площадью в направлении движения рабочего тела. В газовых турбинах наиболее часто используются развитые кольцевые диффузоры с достаточно высокой степенью расширения n ($n = F_2/F_1$, где F_1 – площадь входного сечения диффузора; F_2 – площадь выходного сечения диффузора).

Согласно опытным данным в кольцевом диффузоре при степени расширения $n = 4$, равномерном поле скоростей в его входном сечении и безотрывном течении коэффициент восстановления энергии ξ может достигать 80–83 %. То есть, примерно 80 % кинетической энергии потока, выходящего из газовой турбины, может быть преобразовано в потенциальную энергию. Для современных мощных высокотемпературных газовых турбин это означает возможность снизить давление за последней ступенью с $p_2 = 1,05$ бар до $p_2 = 0,92$ – $0,94$ бар, увеличить за счет снижения указанного давления мощность турбины на 6–8 %.

Реальный эффект от установки таких диффузоров за газовой турбиной оказывается существенно меньшим, т.к. за последней ступенью поток характеризуется значительной радиальной неравномерностью поля скоростей и направление этих скоростей может заметно отличаться от осевого направления. Кроме того, в проточной части таких диффузоров располагаются мощные крепежные ребра, существенно увеличивающие аэродинамические сопротивления. В результате коэффициент восстановления энергии снижается до 45–50 % и реальный прирост мощности редко превышает 3–4 % при очень больших осевых габаритах рассматриваемых диффузоров.

Габариты диффузора могут заметно превышать осевые размеры собственно газовой турбины. При этом возникает серьезная проблема с обеспечением вибрационной надежности всего выхлопного тракта газовой турбины.

В ряде случаев уровень вибрации нагруженных стенок диффузоров достигает недопустимо высоких значений, вызывающих в конечном счете появление трещин на внешнем обводе диффузора и даже его разрушение.

В основе возникновения высоких динамических нагрузок на стенках диффузоров лежат чисто аэродинамические причины, обусловленные характером течения внутри проточной части диффузора.

Как показывают наши исследования область наиболее интенсивной генерации пульсаций давления в движущихся жидких и газообразных средах, которые, в конечном счете, и определяют величину динамических нагрузок на стенки каналов, происходит в области изменения знака продольного градиента скорости. В диффузорах эта область

располагается во входном сечении этих устройств, где конфузорное или безградиентное течение переходит в диффузорное течение.

Этот вывод является весьма важным, т.к. до настоящих исследований считалось, что пульсации давления в диффузорах нарастают вдоль его оси и достигают наибольших значений в выходном сечении.

На рис. 1 показано, как меняется осциллограмма пульсаций давления вдоль плоского диффузора с углом раскрытия образующих $\alpha = 7^\circ$, а на рис. 2 изображены эти же осциллограммы, полученные при $\alpha = 15^\circ$.

Как в первом, так и во втором случае максимальные амплитуды пульсаций давления были зафиксированы непосредственно во входном сечении исследованных диффузоров, причем с увеличением угла раскрытия диффузора до $\alpha = 15^\circ$ эти амплитуды пульсаций давления достигают исключительно больших значений.

Затем при удалении от входного сечения рассматриваемые амплитуды достаточно интенсивно снижаются, но их величина для диффузора с углом $\alpha = 15^\circ$ при всех расстояниях от входного сечения остается в три раза большей, чем для диффузора с углом $\alpha = 7^\circ$.

Проведенные измерения динамических нагрузок на стенки диффузора показали, что по сравнению с плоскими каналами эти нагрузки при угле $\alpha = 7^\circ$ увеличились в 12 раз, а при $\alpha = 15^\circ$ они выросли в 34 раза.

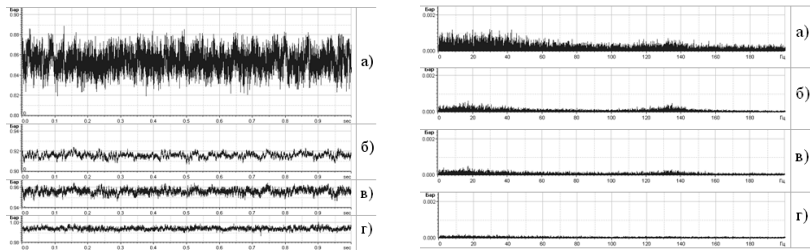
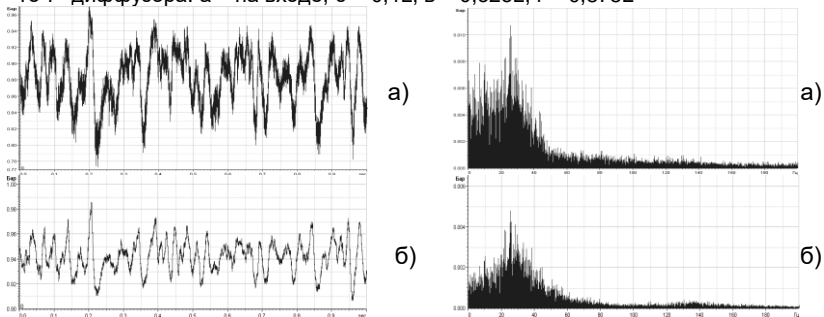


Рис. 1. Осциллограммы и спектрограммы пульсаций давления на стенке плоского 7° диффузора: а – на входе; б – 0,1L; в – 0,325L; г – 0,875L



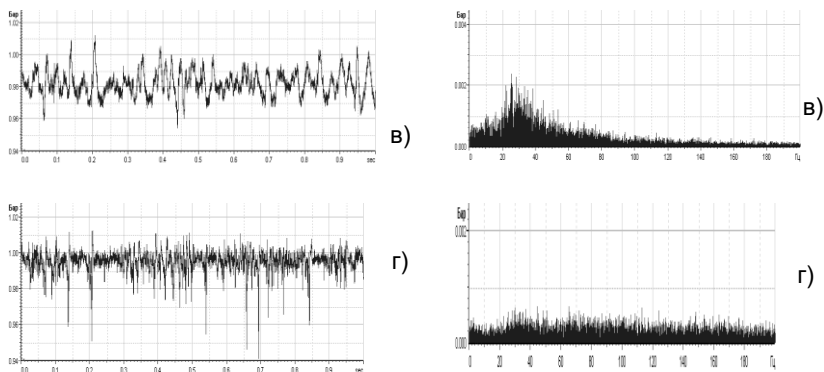


Рис. 2. Осциллограммы и спектрограммы пульсаций давления на стенке плоско-го 15° диффузора: а – на входе; б – $0,1L$; в – $0,325L$; г – $0,875L$

Представленные результаты показывают, что обеспечить вибрационную надежность газотурбинных диффузоров без снижения величины пульсаций давлений в их проточных частях в принципе нельзя.

Изменить существующую ситуацию можно либо путем прямого воздействия на характер течения рабочей среды, либо установкой вблизи внутренней поверхности внешнего обвода кольцевого диффузора специального аэродинамического демпфера, обеспечивающего гашение пульсаций давления только в пристеночной области течения.

Весьма эффективным способом воздействия на течение внутри диффузора является продольное оребрение внутренней поверхности его внешнего обвода. Суть такого оребрения, показанного на рис. 3, состоит в установке вдоль обтекаемой поверхности 1 клиновидных ребер 2 с расположением их вершин во входном сечении. При этом свободные части ребер выполняются параллельными продольной оси диффузора. Таким образом, свободный от ребер канал представляет собой кольцевой цилиндр, а все расширение потока происходит в секторном канале, образованном клиновидными ребрами.

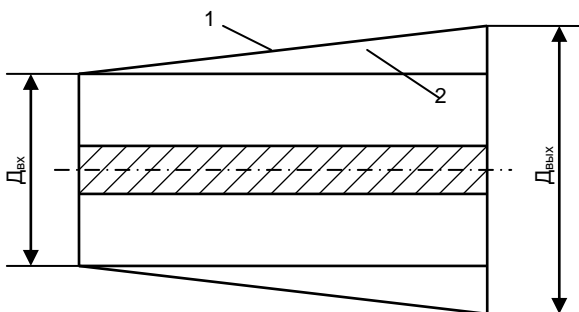


Рис. 3. Кольцевой диффузор с внутренним оребрением: 1 – внешняя поверхность; 2 – ребро

Результаты исследования диффузора с продольными клиновидными ребрами и углом $\alpha = 7^\circ$ показали, что при установке ребер происходит интенсивное снижение амплитуд пульсаций давления по всей проточной части диффузора.

Еще больший эффект был получен при продольном оребрении диффузора с учетом раскрытия $\alpha = 15^\circ$ (рис. 4). В этом случае амплитуда пульсаций давления снизилась до уровня, характерного для диффузора с углом раскрытия $\alpha = 7^\circ$. Поскольку коэффициент восстановления давления в сравниваемых диффузорах практически одинаков, то введение продольного оребрения не только позволяет серьезно снизить динамическую нагрузку на их стенки, но и существенно сократить осевую длину газотурбинных диффузоров.

Отметим так же, что при установке ребер виброперемещение, измеренное в среднем сечении диффузора, снизилось примерно в 3 раза, а уровень шума на расстоянии 1 метра от исследованного диффузора уменьшился на 60 %.

На заключительном этапе проведенных исследований рассматривалось влияние закрутки потока во входном сечении оребренного диффузора на его восстановительную способность. Здесь, по сравнению с гладкими диффузорами, при углах закрутки $\varphi = 30^\circ$ коэффициент восстановления давления снизился всего на 5–6 %.

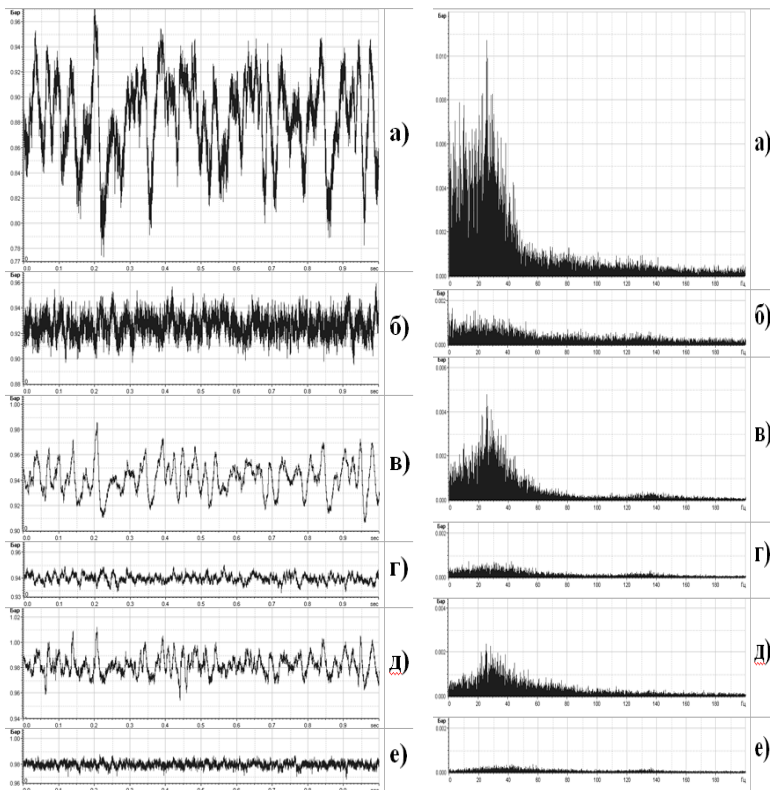


Рис. 4. Осциллограммы и спектрограммы пульсаций давления на стенке 15° диффузора: а, в, д – с гладкими стенками; б, г, е – с продольным оребрением; а, б – на входе; в, г – $0,1L$; д, е – $0,325L$

Список литературы

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. – М.: Энергия, 1970.

Оценка достоверности косвенного определения ионогенных примесей водного теплоносителя

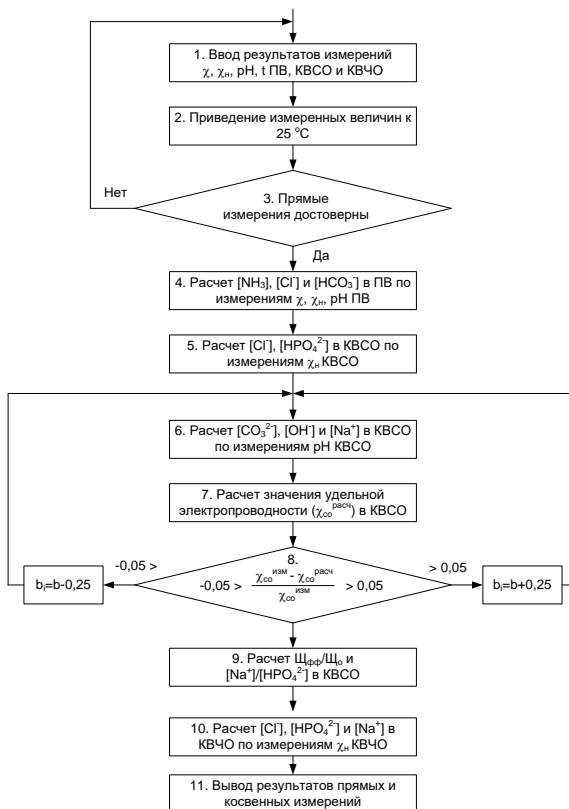
Контроль качества котловой воды энергетических котлов является важной задачей в организации химического контроля водного режима на тепловых электрических станциях (ТЭС). Устойчивое нормативное качество котловой воды барабанных котлов, прежде всего, определяемое по избытку фосфатов (по массовой концентрации, далее концентрации фосфатов, находящихся в растворенной форме в котловой воде) обеспечивает безаварийную работу котельного оборудования. Снижение допустимых величин избытков фосфатов, регламентированного нормами ПТЭ [1] для барабанных котлов с давлением 13,8 МПа, требует надежного, желательного автоматизированного их контроля.

В настоящее время химический контроль за качеством водного теплоносителя, согласно правилам технической эксплуатации, ведется по следующим параметрам:

- удельная электропроводность прямой пробы (χ) или Н-катионированной пробы ($\chi_{\text{Н}}$), рН, концентрация фосфатов (PO_4^{3-}), натрий (Na^+), а так же щелочность общая и щелочность по фенолфталеину;
- концентрация соединений железа.

При этом первая группа характеризует названные выше, как правило, быстротекущие нарушения водно-химического режима (ВХР) и только первые три показателя (χ , $\chi_{\text{Н}}$, рН) измеряется автоматически промышленными приборами с высокой разрешающей способностью. Другие показатели либо не отличаются высокой точностью или надежностью измерений в области предельно разбавленных растворов, какой является котловая вода энергоблоков, либо определяются методами ручного химического анализа, что снижает в целом оперативность и надежность химического контроля качества котловой воды энергетических котлов и создает значительные препятствия в разработке и внедрении систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) ВХР на ТЭС с барабанными котлами.

В этих условиях химконтроль должен обеспечивать надежное и своевременное получение информации о нормируемых параметрах ВХР путем прямого измерения или косвенного (расчетного) определения соответствующих показателей [2]. Достаточную для создания СХТМ надежность и точность имеют кондуктометры и отчасти рН-метры. Эти приборы и легли в основу разработанного в ИГЭУ на кафедре ХХТЭ группой ученых под руководством д.т.н., профессора Ларина Б.М. метода расчетного определения концентрации фосфатов в котловой воде [3]. Блок-схема косвенного определения концентраций примесей котловой воды приведена на рис. 1.



Учитывая возможные нарушения в работе самих приборов, следует перед включением расчетной программы проверить результаты измерений на приемлемость, чтобы исключить диагностику состояния ВХР на основании неверного (не прошедшего на приемлемость) результата тестирования. Термин приемлемость вводится в [4] ГОСТ 5725-6-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике» и рекомендуется для химконтроля теплоносителя ТЭС.

Оценка на приемлемость результатов прямых измерений, например электропроводности и pH, должна проводиться по следующим критериям:

1. По наличию нарушений в процессе пробоподготовки, куда следует отнести выход за допустимые пределы расхода и температуры пробы теплоносителя через датчики автоматического химконтроля (АХК).

2. По выходу измеряемого параметра за установленный диапазон. Сюда относят:

- выход аналогового сигнала за нормируемый диапазон;
- выход измеряемого параметра за реально возможный диапазон;
- превышение скорости изменения измеряемого параметра за установленный диапазон.

3. По наличию неисправностей в модулях приема и обработки информации, что должно определяться тестовыми программами электронных средств.

4. По наличию разногласий с результатами контрольных измерений. Сюда следует отнести как проверочные измерения образцовым прибором химконтроля (с соблюдением требований подготовки пробы), так и результаты лабораторного химического анализа по сравнению с расчетными концентрациями примесей, полученными на базе измерений электропроводности и рН.

Данные АХК, не получившие обобщенного признака приемлемости, не заносятся в базу данных и требуется их дополнительная проверка и устранение причин, вызвавших это явление. При этом последний, четвертый, пункт из перечисленных критериев часто принимается за главный, а предстоящие три лишь раскрывают причину появившегося нарушения в измерительной системе и могут анализироваться «по требованию». Такой подход может быть принят в измерениях отдельных приборов АХК при отсутствии системы самодиагностики измерений.

Выбор метода обработки результатов определяется задачами дальнейшего использования результатов.

В данном случае экспериментальные исследования (измерения) и анализ результатов проводились с целью метрологической оценки разработанного расчетного алгоритма косвенного определения нормируемого показателя, например концентрации фосфатов, по измерению удельной электропроводности (χ_i и χ_n) и рН охлажденной пробы водного теплоносителя энергоблока. В ходе промышленного эксперимента на ИвТЭЦ-3 проводились измерения в потоке охлажденной пробы водного теплоносителя анализатором «АПК-051» значений χ_n , рН и температуры. По измеренным и приведенным к 25 °С значениям контролируемых параметров рассчитывались концентрации фосфатов в чистом и солевом отсеках. Параллельно проводился химический анализ проб воды на фосфаты. Некоторые результаты настроечных опытов приведены в табл. 1. В данном случае концентрация примесей в потоке теплоносителя могла изменяться во времени, что и было характеристикой состояния водно-химического режима энергоблока. Здесь дается оценка правильности расчетного определения концентрации фосфатов по измеренным значениям удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы, а так же величины рН в потоке теплоносителя.

В соответствии с ГОСТ 8.207-76 (переиздание 1991 г.) «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений» была проведена статистическая обработка результа-

тов эксперимента – прямых измерений удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы и рН котловой воды солевого отсека барабанного котла (ст. №3) Ивановской ТЭЦ-3 (табл. 1).

Таблица 1. Результаты измерений и расчетные показатели качества котловой воды барабанного котла ТП-87 ст. №3 (Ивановской ТЭЦ-3)

t, °C	Электро-проводность χ , мкСм/см	Электро-проводность Н-пробы χ_n , мкСм/см	рН. ед. рН	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{co}}$ анализ, мкг/дм ³	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{co}}$ расчетн., мкг/дм ³
23,56	88,72	34,35	10,51	7,00	8,23
23,2	82,97	31,92	10,48	7,20	7,62
22,76	86,81	33,05	10,50	7,00	7,91
22,55	93,13	36,24	10,54	8,10	8,70
22,54	83,77	32,36	10,50	7,30	7,71
22,33	85,17	31,03	10,49	7,40	8,60

Результаты обработки приведены на рис. 2.



Рис. 2. Определение доверительного интервала при измерении удельной электропроводности

Поскольку полученные результаты измерений могут содержать различные по своей природе ошибки, вносящие некоторую погрешность в окончательный результат, то необходимо проверить их на наличие грубых промахов.

Для определения и «отбраковки» промахов при обработке результатов эксперимента можно использовать распределение Стьюдента согласно ГОСТ 8.207.-76. Грубые промахи могут появиться вследствие ошибок экспериментатора, выхода из строя измерительной аппаратуры нарушения режима установки и т.д. Признаком ошибок такого рода являются несоответствия наблюдаемых величин с физической сущностью исследуемого процесса или значительное отклонение данных от их среднего значения. При усреднении экспериментальных данных данные грубые промахи могут существенно исказить конечные ре-

зультат. Поэтому они должны быть исключены из совокупности обрабатываемых значений.

На грубую ошибку указывает также существенное отклонение одного или нескольких значений от общей массы результатов.

Для отбраковки грубых промахов t -распределение Стьюдента преобразуется в g -распределение. Параметром этого распределения является величина:

$$g_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{s} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}} \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение измеряемой величины; \bar{s} – дисперсия среднего; n – число измерений.

Если величина g_i попадает в доверительный интервал, то нет основания считать величину x_i грубым промахом и её следует оставить в ряду результатов.

Оценка достоверности косвенного определения концентрации котловой воды может быть выполнена на основании обработки результатов прямых измерений. Здесь представлена методика построения регрессионных моделей для определения концентрации фосфатов по комплексу косвенных измерений, приведен пример регрессионной зависимости двух переменных – удельная электропроводность и концентрация фосфатов.

Косвенное определение концентрации фосфатов в котловой воде реализуется путем решения математической модели ионных равновесий по измеренным значениям удельной электропроводности и pH питательной и котловой воды.

Существуют различные характеристики, отражающие адекватность математической модели [4]. В данном случае предлагается использовать критерий Фишера, который позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух рядов наблюдений. Для вычисления нужно найти отношение дисперсий двух выборок, причем так, чтобы большая по величине дисперсия находилась бы в числителе, а меньшая – в знаменателе.

В качестве опорной (целевой) функции для формирования регрессионной зависимости, связывающей искомую функцию с независимыми факторами, принята линейная функция вида: $y = a + bx$, поскольку данная функция наиболее точно определяет зависимость двух переменных χ (χ_n) и PO_4^{3-} .

Необходимо обработать экспериментальные данные таким образом, чтобы по возможности точно отразить общую тенденцию зависимости y от x , но вместе с тем сгладить отклонения, связанные с влиянием случайных величин неконтролируемых факторов. Задача сводится к выбору зависимости $f(x)$ и ее числовых параметров таким образом, чтобы эта зависимость в некотором смысле наилучшим об-

разом отображала экспериментальные данные. При этом предполагается, что связь между величинами x и y существует функциональная связь $y = f(x)$. Уравнение $y = f(x)$ называется уравнением регрессии, а параметры a , b – коэффициентами регрессии.

Для решения подобных задач применяется метод наименьших квадратов. Этот метод дает возможность при заданном типе зависимости так выбрать числовые параметры функции, чтобы кривая наилучшим образом отражала экспериментальные данные.

Обработка данных по методу наименьших квадратов производится в следующей последовательности:

1. Данные результатов выборки заносятся в таблицу и производятся вычисления соответствующих сумм.

2. Уравнение регрессии имеет вид $y = a + bx$. Рассчитываются коэффициенты линейной регрессии a и b .

3. Затем находятся дисперсии y относительно среднего S_y^2 и остаточная дисперсия

4. Вычисляется значение критерия Фишера F , соответствующее найденной регрессионной зависимости

$$F = \frac{S_y^2}{S_M^2}.$$

5. Из таблицы F – распределения для принятого уровня значимости α определяется критическое значение $F_{кр}$, которое сравнивается с расчетным. При $F > F_{кр}$ представление результатов эксперимента с помощью уравнения регрессии признается адекватным, после чего переходят к пункту 4. В противном случае отказываются от описания результатов с помощью линейной зависимости и ищут другой вид функции.

6. Рассчитывают коэффициент корреляции, который определяет силу линейной связи между двумя переменными:

Величина коэффициента корреляции находится в пределах $-1 \leq +1$. Знак коэффициента корреляции определяет направление изменения одной величины при изменении другой. Увеличение значения x приводит в среднем к увеличению y , при < 0 – к уменьшению y . Абсолютная величина определяет тесноту линейной связи x и y . При $= 1$ все значения y будут находиться на прямой, описываемой уравнением $y = a + bx$. При $= 0$ величины x и y линейно независимы.

Таким образом:

1. Проведена метрологическая оценка результатов расчетного (косвенного) определения концентрации фосфатов по значениям электропроводности (χ , χ_H) и pH , а также результатов прямых измерений.

2. Установлена зависимость между прямыми и косвенными данными, что отражает адекватность математической модели.

3. Прецизионность математической модели удовлетворительна: отклонение измеренной расчетной концентрации фосфатов находится

в пределах 10 %, что приемлемо для оперативного контроля качества котловой воды.

4. Существенный вклад в электропроводность вносят хлориды, ионы натрия, фосфаты, гидраты и карбонаты, а в котловой воде чистого отсека – аммиак. Из-за этого измерение электропроводности прямой пробы не может дать надежную информацию для организации автоматизированного дозирования фосфатов. Именно одновременное измерение электропроводности (χ , χ_n) и величины рН дает возможность определения нормируемых показателей качества котловой воды. Удельная электропроводность Н–катионированной пробы отражает содержание хлоридов и фосфатов в котловой воде, следовательно, по χ_n можно определить истинное содержание фосфатов в котловой воде. Поскольку установлена линейная зависимость между удельной электропроводностью Н–катионированной пробы и концентрацией фосфатов, то можно осуществлять автоматическое дозирование раствора тринатрийфосфата по показаниям χ_n .

Список литературы

1. РД 153-34.1-37.532.2-2001. Общие технологические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций. – М., 2001.

2. Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Козюлина Е.В. Повышение информативности мониторинга водного режима конденсатно-питательного тракта энергоблоков // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 2–9.

3. Патент РФ 2244294. Способ калибровки рН-метров / Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина, Б.М. Ларин и др. // Изобретения. – 2005.

4. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и приемлемость) методов и результатов измерений. – М., 2002. – Ч. 6.

Б. М. Ларин, А. Б. Ларин
(кафедра химии и химических технологий в энергетике)

Полномасштабные промышленные испытания системы автоматического химконтроля качества теплоносителя котла №3 ИВТЭЦ-3 в 2011 году

В статье представлены результаты промышленных испытаний нового метода автоматического химического контроля качества котловой воды барабанного энергетического котла ($p_6 = 13,8$ МПа). Показана возможность использования Н–катионитовой колонки для измерений удельной электропроводности Н–катионированной пробы котловой воды в течение длительного времени.

Для реализации метода автоматического определения качества котловой воды с использованием измерения удельной электропроводности прямой (χ) и Н–катионированной (χ_n) пробы была разработана

измерительная система, которая включает в себя: устройство подготовки пробы (УПП) (1), клапаны переключения потоков проб (2, 3), термометра (4), последовательно установленных датчиков кондуктометров (5, 7), Н-катионированной колонки (6), расход пробы устанавливается по ротаметру (8). Ввод данных на ЭВМ может осуществляться непосредственно с приборов или в ручном режиме.

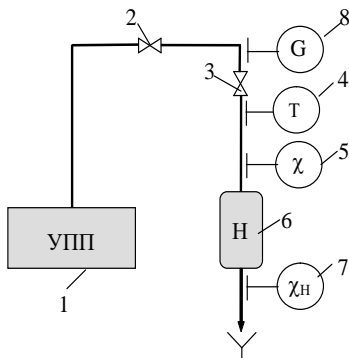
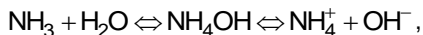


Рис. 1. Принципиальная схема приборного комплекса

Работа измерительной системы осуществляется следующим образом: пройдя устройство подготовки пробы через клапан разделения потоков проб вода поступает на датчик кондуктометра (измеряется удельная электропроводность и температура исходной пробы), затем, пройдя Н-катионитовую колонку, проба поступает на следующий датчик кондуктометра, где измеряется удельная электропроводность и температура Н-фильтрата.

Использование данной установки не требует значительных затрат, так как все приборы, которые применяются для этих измерений, являются штатными приборами химконтроля и на всех электрических станциях находятся в эксплуатации.

Промышленные испытания проводились в течение отопительного сезона 2010/2011 годов. Анализ данных автоматического химконтроля измерений и расчетов показывает следующее: удельная электропроводность прямой охлажденной (25 °С) пробы питательной воды находилась в пределах 3,5÷5,0 мкСм/см (табл. 1), перегретого пара – 3,5÷5,2 мкСм/см, т.е. $\epsilon_{\text{пн}}$ незначительно превышает $\epsilon_{\text{пв}}$. Такое сходство объясняется тем, что значения $\epsilon_{\text{пв}}$ и $\epsilon_{\text{пн}}$ определяются в основном диссоциированным гидроксидом аммония:



который полностью переходит из котловой воды в пар.

При этом концентрация аммиака (расчетная) в паре на 50÷100 мкг/кг больше, чем в питательной воде (табл. 1).

Таблица 1. Результаты разовых измерений (случайная выборка) качества водного теплоносителя барабанного котла ТП-87 (ст. №3) Ивановской ТЭЦ-3 в период с октября 2010 г. по апрель 2011 г.

			08.12.10	09.01.11	27.02.11	19.03.11	24.04.11
КВ-СО (ПЦ)	æ	мкСм/см	~10 (пуск)	70	74	85	80
	æ _H	мкСм/см	7,5 (пуск)	28	27	22	25
	pH	ед. pH	10,3	10,45	10,40	10,5	10,5
КВ-ЧО	æ _H	мкСм/см	2,7	2,7	2,05	3,6	3,0
	pH	ед. pH	9,5	9,72	9,65	--	--
Питат. вода	æ	мкСм/см	4,5	3,65	3,9	--	--
	æ _H	мкСм/см	0,25	0,20	0,26	0,28	0,28
	pH	ед. pH	9,35	9,25	9,24	9,25	9,17
	NH ₃	мкг/кг	360	290	370	350	270
Перегр. пар	æ	мкСм/см	4,5	3,7	4,1	--	--
	æ _H	мкСм/см	0,37	0,27	0,29	0,39	0,32
	pH	ед. pH	9,30	9,15	9,0	9,15	9,15
	NH ₃	мкг/кг	480	410	475	375	320

Увеличение удельной электропроводности H-катионированных проб пара по сравнению с пробами питательной воды на значительную величину $0,03 \pm 0,10$ мкСм/см при измеренных значениях $0,25 \pm 0,35$ мкСм/см при одновременном уменьшении pH проб перегретого пара может свидетельствовать о присутствии в питательной воде потенциально-кислых органических веществ (ПКВ), разлагающихся при высоких температурах котловой воды с образованием летучих органических веществ (ЛОВ) кислого характера.

Удельная электропроводность охлажденных проб ($t = 25$ °C) котловой воды солевого отсека (правый циклон – ПЦ) не превышает значений 100 мкСм/см, а H-катионированных проб – 50 мкСм/см и определяется, главным образом, фосфатом натрия – Na_2HPO_4 и гидроксидом натрия – NaOH в прямой пробе, и фосфатом (NaH_2PO_4) и хлоридом натрия (NaCl) – в H-катионированной пробе котловой воды.

Невысокие значения удельной электропроводности котловой воды (для сравнения: удельная электропроводность водопроводной воды в г. Иваново составляет 320 ± 380 мкСм/см) позволяют считать перспективным метод автоматического химконтроля измерением удельной электропроводности H-катионированных проб котловой воды, давно принятый в энергетике для контроля качества питательной воды и пара энергетических котлов [3, 4].

Промышленное использование предложенного метода может ограничиваться нарушениями в измерениях удельной электропроводности H-катионированной пробы при быстром срабатывании катионита в H-колонке, установленной на потоке охлажденной пробы котловой воды солевого отсека. Поэтому в данной работе был проведен анализ работы H-колонки в течении всего периода испытаний.

Свежий катионит был загружен в предвключенную Н-катионитную колонку, используемую для измерений χ_{H} котловой воды солевого отсека барабанного котла №3 29 октября 2010 года.

Котельный агрегат №3 работал с периодическими остановами на ремонт, соответственно фильтрация через Н-колонка во время остановов не осуществлялась. Для расчета суммарного времени работы колонки часы простоя не учитывались.

Для автоматического определения момента срабатывания Н-колонки можно предложить следующие критерии:

1. Увеличение значения $\chi_{\text{H}}^{\text{CP}}$ на контрольном промежутке времени $(\chi_{\text{H}})_{\text{n}} - (\chi_{\text{H}})_{\text{n-1}} > 0$, где n – очередное (усредненное) измерение значений χ и χ_{H} .

2. Снижение $\Delta\chi = \chi^{\text{CP}} - \chi_{\text{H}}^{\text{CP}}$ до значений менее $0,5 \cdot \Delta\chi^{\text{CP}}$ (данное условие объективно при нормальной работе энергетического барабанного котла, т.е. исключая аварийные и пусковые режимы работы котла).

Таблица 2. Среднесуточные значения удельной электропроводности охлажденных проб котловой воды солевого отсека котла №3 Ивановской ТЭЦ-3 в период, предшествующий срабатыванию Н-колонки

Дата	Среднесуточное значение χ_{H} котловой воды правого циклона, мкСм/см	Среднесуточное значение χ котловой воды правого циклона, мкСм/см	$\Delta\chi = \chi^{\text{CP}} - \chi_{\text{H}}^{\text{CP}}$	$0,5 \cdot \Delta\chi^{\text{CP, март}}$
17.03.2011	19,25	57,53	38,28	46,00
18.03.2011	20,85	59,83	38,98	
19.03.2011	23,87	75,85	51,98	
20.03.2011	20,97	67,57	46,59	
21.03.2011	23,32	80,75	57,42	
22.03.2011	18,08	59,54	41,45	
23.03.2011	34,18	91,41	57,23	
24.03.2011	25,30	88,85	63,54	
25.03.2011	10,32	62,06	51,73	
26.03.2011	10,87	54,44	43,57	
27.03.2011	22,21	83,66	61,44	
28.03.2011	29,37	72,53	43,16	
29.03.2011	30,86	67,50	36,63	
30.03.2011	37,16	75,16	38,00	
31.03.2011	51,18	97,83	46,64	
01.04.2011	52,96	75,21	22,24	
02.04.2011	54,66	71,47	16,81	
03.04.2011	55,20	69,52	14,32	
04.04.2011	59,60	72,12	12,51	
05.04.2011	68,46	81,46	12,99	

Проверка адекватности критериев срабатывания выполнена по результатам эксплуатационного химического контроля качества котловой воды солевого отсека барабанного котла №3 ИВТЭЦ-3 (табл. 2).

Подтверждением правильности сделанного вывода о срабатывании Н-колонки служит и тот факт, что после замены ее на другую со «свежим» катионитом в Н-форме показания кондуктометра по измерениям χ_n вновь вернулись на прежние значения в 20–25 мкСм/см.

Истощенный катионит в фильтре необходимо регенерировать, или заменять на «свежий», как обычно и поступают.

Таким образом, исходного объема катионита ($V = 1,7 \text{ дм}^3$) хватило на 4 месяца отопительного периода, а увеличение объема катионита до $2 \div 2,3 \text{ дм}^3$ предположительно хватит на весь отопительный период работы барабанного котла с давлением $p_6 = 13,8 \text{ МПа}$. Предложенный метод автоматического контроля срабатывания Н-колонки по разности показаний кондуктометра, установленного на котловой воде до и после Н-катионитной колонки, вполне достоверен и не требует дополнительных устройств.

Список литературы

1. **Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Тихомирова Ю.Ю., Киет С.В.** Определение концентрации фосфатов в котловой воде путем измерения электропроводности // Теплоэнергетика. – 2008. – № 7. – С. 21–27.

2. **Патент** РФ №2389014. Способ определения концентрации фосфатов в котловой воде барабанных энергетических котлов // Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, А.Б. Ларин, Н.А. Еримина. Зарегистр. 10.05.2010.

3. **Мостофин А.А.** Уточнение показателей кондуктометров с предвключенным водород-катионитным фильтром // Электрические станции. – 1974. – № 1. – С. 79–87.

4. **Коровин В.А., Рубчинский С.М.** Влияние углекислоты на показания кондуктометров с предвключенными водород-катионитными фильтрами // Электрические станции. – 1974. – №1. – С. 81–82.

А.А. Коротков, ст. преп., Е.В. Барочкин, д-р техн. наук,
Г.В. Ледуховский, канд. техн. наук
(кафедра тепловых электрических станций)

Статика и кинетика процессов декарбонизации воды в условиях термической атмосферной деаэрации

Водно-химический режим энергетических установок обеспечивается путем реализации комплекса мероприятий, одним из важнейших среди которых является термическая деаэрация водного теплоносителя. Струйно-барботажные деаэраторы атмосферного давления широко используются в качестве деаэраторов добавочной воды тепловых электрических станций (ТЭС), деаэраторов питательной воды котлов низкого и среднего давлений, подпиточной воды тепловых сетей.

Эффективность работы деаэраторов по удалению из воды коррозионно активных газов оказывает существенное влияние на надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и котельных и трубопроводов тепловых сетей и определяется значениями конструктивных и режимных параметров. Число сочетаний значений этих параметров велико, поэтому на практике технологически оптимальный режим работы деаэратора устанавливается только в ходе натурных испытаний, что сопряжено с материальными и трудовыми издержками. В связи с этим актуальна разработка математических моделей, обеспечивающих расчет показателей режима работы деаэратора с требуемой точностью. Использование таких моделей не только позволяет сократить расходы на испытания действующих установок, но и повышает обоснованность проектных решений при создании новых объектов.

Опубликованные работы по термической деаэрации воды [1, 2] содержат математические модели, обеспечивающие расчет процессов теплообмена и десорбции растворенного кислорода в струйных и барботажных деаэрационных элементах. Систематизированные данные, позволяющие прогнозировать работу деаэратора по удалению из воды диоксида углерода, отсутствуют. Однако эффективность декарбонизации воды оказывает существенное влияние на скорость процессов коррозии металла, особенно при наличии в воде растворенного кислорода, а также на интенсивность накипеобразования в трубопроводах и оборудовании, если деаэрации подвергается плохо умягченная или неумягченная вода.

В условиях эксплуатации эффективность декарбонизации воды в деаэраторе оценивается по значению водородного показателя pH_{25} деаэрированной воды, который наряду с остаточной концентрацией растворенного кислорода является нормируемым показателем. Практика наладки атмосферных деаэраторов показывает, что эффективной работы деаэратора по удалению из воды растворенного кислорода режимными мероприятиями добиться проще, чем технологически приемлемых значений pH_{25} деаэрированной воды. Это обусловлено большей, по сравнению с кислородом, степенью гидратации молекулярного диоксида углерода водой и наличием химических взаимодействий диоксида углерода с примесями воды. Можно считать, что при обеспечении нормативных значениях pH_{25} деаэрированной воды содержание в ней растворенного кислорода также удовлетворяет норме. Таким образом, при моделировании процессов термической деаэрации воды проблеме декарбонизации следует уделять особое внимание.

При моделировании процессов хемосорбции-десорбции углекислоты кроме собственно физической десорбции диоксида углерода необходимо учитывать протекание реакций гидратации молекулярного диоксида углерода, диссоциации угольной кислоты, гидролиза ее солей, а также реакций взаимодействия диоксида углерода с содержащимися в водном растворе примесями. Итоговая скорость хемосорбции-десорбции при последовательном протекании ее стадий определяется

скоростью самой «медленной» стадии. Для выявления статических и кинетических условий протекания указанных процессов требуются соответствующие экспериментальные исследования.

Нами проведены тепло-химические испытания деаэраторов ДА-300м и ДСА-300 с организацией отбора проб воды из внутренних элементов аппаратов для получения опытных данных об эффективности декарбонизации воды в отдельных деаэрационных устройствах. Например, для деаэратора ДСА-300 предусмотрен отбор проб следующих потоков: химически очищенной воды на входе в деаэрационную колонку; воды с внешней стороны второй тарелки деаэрационной колонки; воды с внутренней стороны второй тарелки деаэрационной колонки; воды с выхода струйной ступени деаэрационной колонки; воды из середины деаэраторного бака; воды с выхода деаэраторного бака; пара, подаваемого в деаэратор.

В ходе проведения экспериментальных исследований выполнены измерения теплотехнических параметров теплоносителей, а также химические анализы качества воды и пара с определением массовых концентраций свободной углекислоты, удельной электропроводности, водородного показателя рН, щелочности общей и по фенолфталеину. Метрологическое обеспечение исследований составляли преимущественно образцовые средства измерения. Проведено 69 опытов при работе в режимах с подачей только основного, только барботажного и совместной подачей основного и барботажного пара в деаэраторы. Длительность каждого опыта составляла не менее 1,5 ч. Для обеспечения представительности результатов в ходе опытов достигалась стабилизация параметров воды и пара. Каждый теплотехнический параметр в рамках одного опыта измерялся не менее 9 раз, каждый химический параметр – не менее 3 раз.

Первичная обработка результатов измерений осуществлена в соответствии с государственными стандартами, регламентирующими процедуры обработки результатов испытаний и способы представления полученных данных. Согласно требованиям указанных стандартов, учитывая задачи испытаний, был составлен алгоритм обработки результатов теплотехнического или теплохимического эксперимента. Этот алгоритм предусматривает последовательное выполнение ряда операций: идентификацию и отсеив выбросов; оценку правильности результатов измерений и исключение известных систематических погрешностей; проверку приемлемости и установление окончательного результата измерений; вычисление оценок стандартных отклонений результатов измерений и окончательных результатов измерений; определение доверительных границ погрешности окончательных результатов измерений; оценку прецизионности результатов измерений теплотехнических параметров; оценку точности, правильности и прецизионности результатов измерений химических параметров.

В табл. 1 представлен пример результатов обработки экспериментальных данных для химических параметров (деаэратор ДСА-300).

Таблица 1. Пример результатов обработки экспериментальных данных для химических параметров (деаэратор ДСА-300)

№ опыта	Деаэрированная вода на выходе из деаэрационного бака			
	Щелочность общая, Щ _{общ} , мкг-экв/дм ³	Щелочность по фенолфталеину, Щ _{фф} , мкг-экв/дм ³	Водородный показатель, рН ₂₅ , ед. рН	Массовая концентрация диоксида углерода, СО ₂ , мкг/дм ³
1Б	1200 ± 96	150 ± 12	–	0 ± 0
1	1360 ± 109	0 ± 0	7,680 ± 0,050	3300 ± 883
2	1370 ± 110	0 ± 0	7,705 ± 0,050	3960 ± 925
2Б	1320 ± 106	65 ± 5	8,790 ± 0,050	0 ± 0
3Б	1630 ± 130	150 ± 12	9,080 ± 0,050	0 ± 0
4Б	1660 ± 133	120 ± 10	8,975 ± 0,050	0 ± 0
3	1620 ± 130	0 ± 0	7,950 ± 0,050	2640 ± 834
5Б	1370 ± 110	110 ± 9	8,995 ± 0,050	0 ± 0
6Б	1360 ± 109	145 ± 12	9,145 ± 0,050	0 ± 0
7Б	1360 ± 109	60 ± 5	8,735 ± 0,050	0 ± 0
4	1360 ± 109	0 ± 0	7,600 ± 0,050	3960 ± 925
5	1440 ± 115	0 ± 0	7,600 ± 0,050	3080 ± 868
1Б+	1360 ± 109	210 ± 17	9,475 ± 0,050	0 ± 0
6	1390 ± 111	0 ± 0	7,755 ± 0,050	3080 ± 868

Полученные экспериментальные данные использованы для идентификации моделей технологических процессов, в том числе при исследовании процессов декарбонизации воды в струйных отсеках. Остановимся на этих результатах подробнее.

Анализ изменения массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок в условиях опытов (рис. 1) показывает, что верхние струйные отсеки работают преимущественно как абсорберы, а содержание свободного диоксида углерода в воде за деаэрационной колонкой мало отличается от его содержания в исходной воде. Имеются опубликованные результаты испытаний атмосферных деаэрационных колонок [1, 2], содержащие аналогичные данные. В качестве объяснения подобных результатов ранее выдвигалась гипотеза о наличии механического захвата диоксида углерода из паровой фазы сильно турбулизированным потоком воды, поскольку, по мнению авторов указанных исследований, равновесная массовая концентрация растворенного диоксида углерода в воде, как и в случае кислорода, существенно меньше фактической массовой концентрации в любой части колонки.

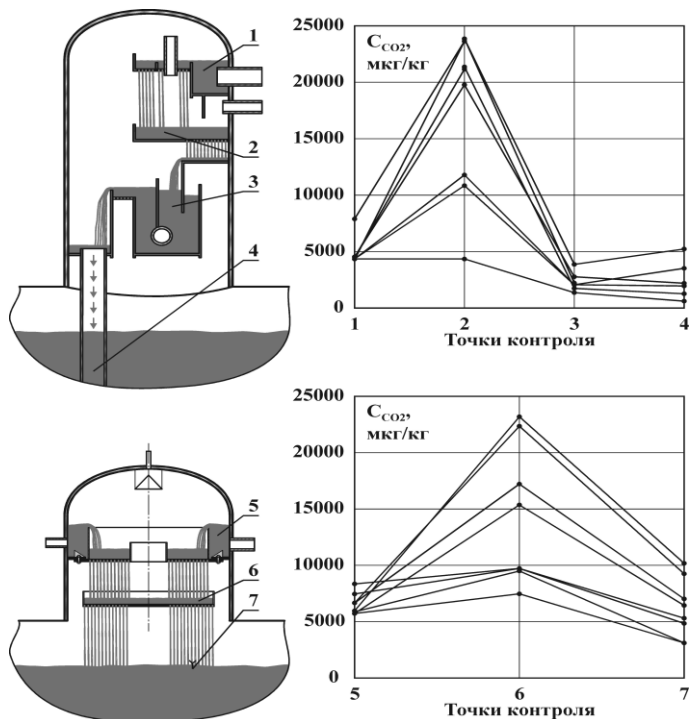


Рис. 1. Изменение массовой концентрации свободного диоксида углерода в воде по элементам деаэрационных колонок деаэраторов ДА-300м (слева) и ДСА-300 (справа) в условиях опытов: C_{CO_2} – массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг; 1 и 5 – вода перед деаэратором; 2 и 6 – вода после верхнего струйного отсека; 3 и 7 – вода после нижнего струйного отсека; 4 – вода после неpravильного барботажного листа деаэрационной колонки

Такое объяснение представляется неполным: если причина заключается только в наличии дисперсного поглощения диоксида углерода водой, то аналогичный эффект должен наблюдаться и по кислороду, чего не отмечается. Это может быть обусловлено лишь отличием статических условий обратимых процессов абсорбции и десорбции газов.

Статические условия характеризуются соотношением равновесного и фактического содержания газа в воде. Проведенные экспериментальные исследования деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м позволили рассчитать равновесные массовые концентрации кислорода и диоксида углерода в воде в различных точках деаэраторов (рис. 2). При этом фактические массовые концентрации газов в паровой фазе по деаэрационным элементам определены по уравнениям материальных балан-

сов воды, пара и газов с использованием результатов измерений. В качестве закона фазового равновесия использован закон Генри.

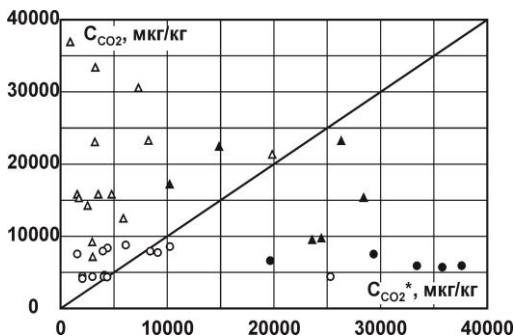
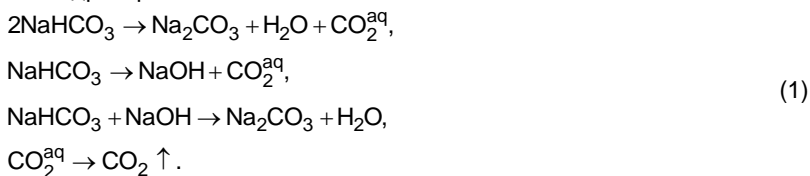


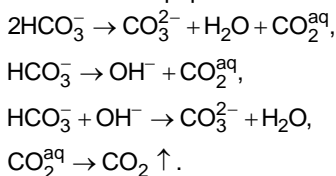
Рис. 2. Результаты анализа статических условий абсорбции-десорбции свободного диоксида углерода в верхних струйных отсеках деаэраторов ДСА-300 и ДА-300М: $C_{CO_2}^*$ – равновесная массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде, мкг/кг; сплошная линия – равновесные условия; точки – результаты расчета при условиях оптов; ● – ДСА-300, верхняя часть отсека; ▲ – ДСА-300, нижняя часть отсека; ○ – ДА-300М, верхняя часть отсека; △ – ДА-300М, нижняя часть отсека; прочие обозначения те же, что на рис. 1

Полученные данные позволяют заключить, что равновесная массовая концентрация свободного диоксида углерода в воде относительно мало отличается от его фактической массовой концентрации: для сравнения, аналогичные концентрации растворенного кислорода отличаются друг от друга в сто и более раз. Можно ожидать также, что содержащийся в паре диоксид углерода, будучи в сравнении с кислородом менее растворимым в воде газом, должен концентрироваться вблизи границы раздела фаз, что еще больше отклоняет систему от равновесия в зону абсорбции. Таким образом, можно заключить, что система «кислород – вода» в условиях работы верхних струйных отсеков деаэраторов всегда далека от равновесия и находится в зоне десорбции. Статические условия для системы «диоксид углерода – вода», напротив, близки к равновесным с возможностью перехода из зоны десорбции в зону абсорбции. При наличии относительно малой по величине разности равновесной и фактической концентраций (движущей силы процесса деаэрации) не следует ожидать интенсивного газообмена по растворенному свободному диоксиду углерода, не говоря уже о его химических связанных формах. То есть при работе атмосферного деаэратора практически вся нагрузка по удалению свободного и, особенно, химически связанного диоксида углерода приходится на деаэраторный бак.

При деаэрации Na-катионированной воды можно предполагать следующий механизм необратимого процесса термического разложения гидрокарбонатов:



или в ионной форме:



Свободный диоксид углерода, образующийся в результате процессов термического разложения гидрокарбонатов, первое время присутствует в воде в растворенной форме, а после пересыщения раствора начинается его дисперсное выделение в виде газовых пузырей.

Предполагая механизм (1), кинетическое уравнение необратимого химического процесса термического разложения гидрокарбонатов можно записать в виде:

$$\frac{dC}{dt} = -KC^2,
 \tag{2}$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде; K – константа скорости реакции.

Эффективность удаления из воды в деаэраторе химически связанных форм диоксида углерода принято оценивать по значению степени разложения гидрокарбонатов σ , которая может быть рассчитана по значениям щелочности общей $\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{дв}}$ и по фенолфталеину $\text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{дв}}$ деаэрированной воды:

$$\sigma = \frac{2\text{Щ}_{\text{фф}}^{\text{дв}}}{\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{дв}}},
 \tag{3}$$

Значение σ для рассматриваемых деаэраторов зависит от времени пребывания воды в деаэраторном баке T , наличия в этом баке затопленного барботажного устройства и его типа. Чем больше время T , тем больше σ . При наличии затопленного барботажного устройства σ больше, чем при его отсутствии. Связь между указанными параметрами при этом линейна. При $T = 1$ ч можно ожидать $\sigma = 0,6$ для деаэраторов с затопленным барботажным устройством в водяном объеме деаэраторного бака и $\sigma = 0,4$ для деаэраторов без барботажа в деаэраторном баке [4].

Опубликованные данные [4] для деаэраторов с барботажом в водяном объеме деаэрационного бака подтверждаются результатами экспериментов (рис. 3). Данные по деаэраторам без барботажа отличаются от ранее опубликованных, причем наблюдается существенный разброс экспериментальных значений σ .

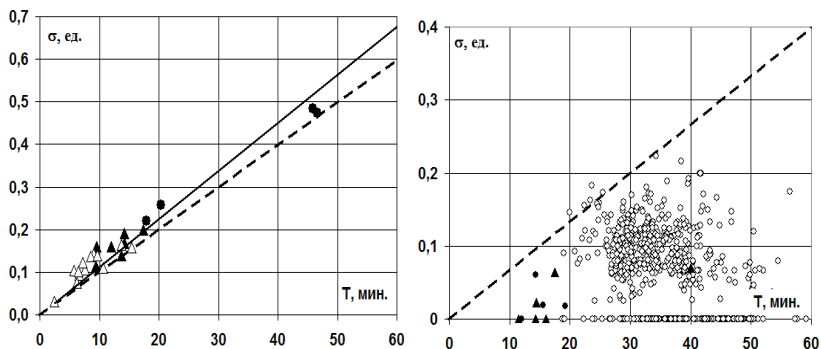


Рис. 3. Экспериментальные значения степени разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от времени пребывания воды в деаэраторе при наличии (слева) и отсутствии (справа) парового барботажа в водяном объеме деаэрационного бака: σ – степень разложения гидрокарбонатов, ед.; T, мин – время пребывания воды в деаэраторе; точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация опытных данных; пунктирные линии – опубликованные данные [4]; Δ – ДА-300м; \blacktriangle – ДСА-300 (два струйных отсека в деаэрационной колонке); \bullet – ДСА-300 (один струйный отсек в деаэрационной колонке); \circ – ДА-50

Представленные на рис. 1, 2 и 3 экспериментальные и расчетные данные доказывают, что выходные по пару струйные отсеки атмосферных деаэраторов могут работать в условиях физической абсорбции свободного диоксида углерода водой, что наряду с наличием дисперсного поглощения газов потоком воды обуславливает нестабильность содержания диоксида углерода в воде за струйными отсеками, а при отсутствии нижестоящей барботажной ступени с приемлемым располагаемым временем пребывания воды в ней – и за деаэратором. Таким образом, использование барьерного парового барботажа в водяном объеме деаэрационного бака позволяет существенно повысить эффективность удаления свободного и, особенно, химически связанного диоксида углерода.

По полученным экспериментальным данным рассчитаны значения константы K скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов в уравнении (2) (рис. 4). В расчетах учтено как поступление свободного и химически связанного диоксида углерода в деаэратор, так и его отвод с выпаром и деаэрированной водой. Разброс полученных

значений K может быть обусловлен не только метрологическими характеристиками методов количественного химического анализа и измерения влияющих на расходы воды и пара теплотехнических параметров, но и неточностью принятой ранее гипотезы о механизме (1) процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторе.

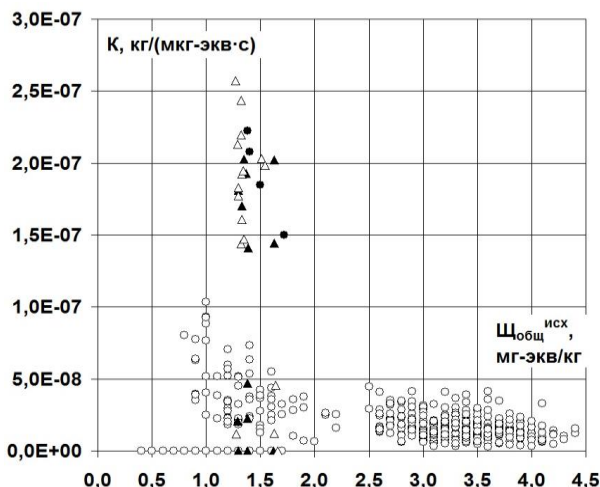


Рис. 4. Экспериментальные значения константы скорости результирующего химического процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах различных конструкций в зависимости от щелочности общей исходной воды при наличии (группа точек при $K > 1,25$ кг/(мкг-экв·с)) и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака: K – константа скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, кг/(мкг-экв·с); $\text{Щ}_{\text{общ}}^{\text{исх}}$ – щелочность общая воды перед деаэратором, мг-экв/кг; прочие обозначения те же, что на рис. 3

Уточнение механизма термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах является предметом дополнительного исследования, которое целесообразно вести методами химической термодинамики с организацией соответствующего лабораторного эксперимента. При этом кроме вероятных реакций взаимодействия диоксида углерода с примесями воды следует учитывать гидратацию молекулярного диоксида углерода и диссоциацию образовавшейся угольной кислоты.

Тем не менее, полученные кинетические характеристики процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах при наличии и отсутствии парового барботажа в водяном объеме деаэраторного бака обеспечивают возможность прогнозирования показателей эффективности удаления из воды свободного и химически связанного диоксида углерода.

Учитывая результаты анализа статических условий абсорбции-десорбции свободного диоксида углерода в деаэрационных колонках и существенную зависимость кинетических характеристик процессов удаления химически связанного диоксида углерода в деаэрационном баке от наличия парового барботажа, особое практическое значение приобретает изучение режимных характеристик затопленных барботажных устройств деаэрационных баков. Представленные выше данные по деаэраторам с паровым барботажем в деаэрационном баке относятся к аппаратам с барботажным устройством в виде одиночного перфорированного коллектора на дне бака длиной около 8 м с расположенными в два ряда отверстиями диаметром 12 мм общим числом 185 шт.

Экспериментальные данные позволяют заключить, что минимально необходимое значение удельного расхода пара на барботаж при использовании такого устройства по условиям обескислороживания и декарбонизации воды составляет соответственно 15 и 20 кг/т; при меньших значениях удельного расхода пара на барботаж эффективность деаэрации резко снижается, а увеличение удельного расхода пара на барботаж сверх указанных значений не приводит к заметному повышению эффективности. Важно также, что при значениях удельного расхода пара на барботаж 20 кг/т и более на эффективность деаэрации воды в баке практически не оказывают влияния прочие теплогидравлические параметры работы деаэратора, за исключением времени пребывания воды в деаэраторе.

Список литературы

1. **Оликер И.И., Пермьяков В.А.** Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
2. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.
3. **Экспериментальные** исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 21–25.
4. **Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.

А. И. Сокольский

Математическое моделирование процесса фильтрации газа в слое ТБО

Слой ТБО представляет собой пористое тело, состоящее из смеси различных по размеру компонентов продуктов жизнедеятельности человека, физические свойства которых различны. В литературных источниках приводятся результаты исследований при моделировании слоя в виде пористого тела, составленного из шаров одинакового диаметра, но слой ТБО имеет структуру мало похожую на пористое тело из шаров.

Целью работы является создание модели для расчета полей давления с применением фрактальной геометрии и последующего использования ее в гидравлических расчетах установок по термической переработке ТБО.

Для создания 3D модели газового пространства слоя ТБО было принято решение использовать регулярный геометрический фрактал, который является пространственным аналогом квадратного ковра Серпинского, называемый губкой Менгера (Menger sponge). Рецепт его создания состоит в следующем. Каждая грань куба, имеющая единичную длину, делится на 9 равных квадратиков так же, как и при построении квадратного ковра Серпинского. В результате исходный куб разбивается на 27 одинаковых кубиков с длиной ребра, равной $1/3$. Затем, удаляя 7 кубиков (один центральный и 6 из центра каждой из граней), противоположные грани исходного куба соединяются сквозным центральным отверстием квадратной формы. В результате из 27 остается 20 маленьких кубиков.

В качестве газовой среды в модели использовался пиролизный газ. На границе контакта геометрической фрактальной модели ТБО и газа скорость движения принималась равной нулю. Начальная скорость воздуха на входе варьировалась в пределах от 0,4 м/с до 1,4 м/с при постоянной мере фрактала.

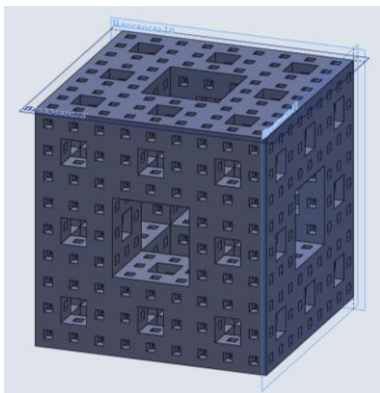


Рис. 1. Фрактальная модель слоя ТБО в виде губки Менгера

Процесс фильтрации продолжается до достижения установившегося режима. Полученное в вычислительном комплексе распределение давления в модели установки приведено на рис. 2.

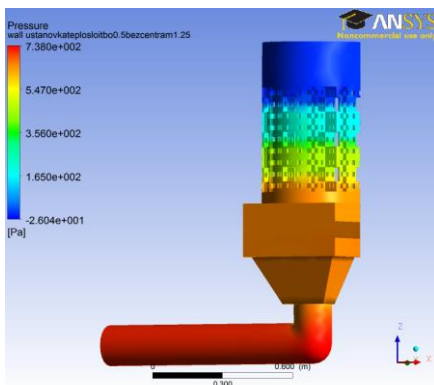


Рис. 2. Распределение давления в сечении слоя ТБО

При моделировании использовался турбулентный режим движения газа, и производилось усреднение давлений в каждом сечении слоя по уровням. Скорость газа на выходе из фрактальной модели усреднялась по сечению.

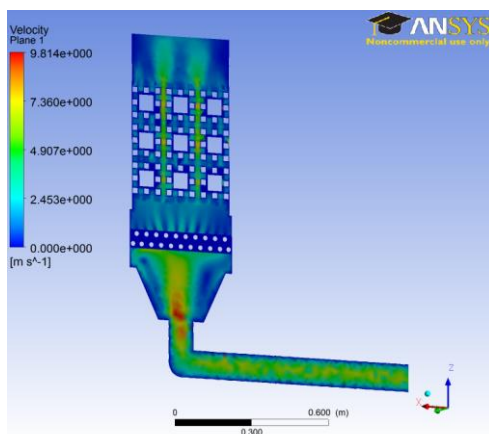


Рис. 3. Распределение скорости движения газа в сечении слоя ТБО

Выводы:

1. Были получены результаты для значений скоростей газа на входе в слой в интервале от 0,4 до 1,4 м/с.

2. Определены оптимальные параметры: высота слоя ТБО в установке при его различной плотности (150 кг/м³ – 0,71 м, 200 кг/м³ – 0,64 м, 250 кг/м³ – 0,59 м, 300 кг/м³ – 0,55 м) и высота рабочей зоны установки фильтрации – 0,9 м.

3. Оптимизированы режимные параметры работы установки: скорость загрузки ТБО в шахту 9–13 м/час (производительность установки от 13 до 15 кг/час).

А. И. Сокольский

Моделирование процесса пиролиза твердых бытовых отходов в технологии получения горючего газа

Для исследования процессов пиролиза органической части ТБО была использована установка, которая позволяет определить выход пиролизных газов и тепловой энергии при пиролизе высушенной органической части твердых бытовых отходов и режимные параметры процесса пиролиза: температуру ТБО, влажность ТБО и количество пиролизного газа.

Целью создания математической модели установки, имитирующей теплотехнологические процессы термической переработки твердых бытовых отходов (ТБО), является определение оптимизации режимных параметров процесса пиролиза ТБО. В качестве целевой функции оптимизации режима работы установки принимается максимальный выход пиролизного газа на единицу массы ТБО. В качестве метода моделирования, работы установки термической переработки ТБО выбран метод моделирования с помощью нейронных технологий.

При решении с помощью нейронной сети первоначально необходимо собрать входные и выходные данные для обучения, которые характеризуют теплотехнологический процесс термического разложения ТБО.

В качестве метода моделирования работы блока для исследования процессов пиролиза органической части ТБО выбран метод моделирования с помощью нейронных сетей.

Нейронные сети – это класс аналитических методов, который основан на идее воспроизведения процессов обучения мыслящих существ (как они представляются исследователям) и функций нервных клеток. Нейронные сети могут прогнозировать будущие значения переменных по уже имеющимся значениям этих же или других переменных, предварительно осуществив процесс так называемого обучения на основе имеющихся данных. Важно отметить, что вся информация, которую нейронная сеть имеет о задаче, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения нейронной сети напрямую зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу.

После того, как нейронная сеть обучена, мы можем применять ее для решения полезных задач. Например, нейронная сеть, грамотным образом обученная, может с большой вероятностью правильно реагировать на новые, не предъявленные ей ранее данные.

При решении задачи с помощью нейронной сети первоначально были собраны входные и выходные данные для обучения, которые характеризуют процесс получения пиролизного газа (табл. 1).

Далее при создании нейросетевой модели встал вопрос выбора конкретной архитектуры сети (числа «слоев» и количества «нейронов» в каждом из них). Размер и структура сети должны соответствовать существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа природа явления обычно не бывает хорошо известна, выбор архитектуры является непростой задачей и часто связан с длительным процессом «проб и ошибок». При создании данной модели использовалась модель многослойного персептрона с двумя скрытыми слоями с количеством эпох, равным 20000.

Таблица 1. Исходные данные

№ п/п	Масса ТБО, кг	Влажность ТБО, %	Температура ТБО, °С	Кол-во CO ₂ , %	Кол-во CO, %	Кол-во CH ₄ , %	Кол-во H ₂ , %	Теплотворная способность пиролизного газа, кДж/м ³
1	0,07	0	250	56,1	42,92	0,68	0,3	5702,50
2	0,07	0	300	54,9	44,1	0,7	0,3	5858,86
3	0,07	0	350	55	41,8	2,9	0,3	6355,59
4	0,07	0	400	52	22,5	25,2	0,3	11898,02
5	0,07	0	450	29,6	11,8	58,3	0,3	22393,92
6	0,07	0	500	19,8	7,8	72	0,4	26803,11
7	0,07	0	550	22	11	61	1	23334,61
8	0,07	0	600	27	19,6	52	1,4	21243,30
9	0,07	0	650	30	27	41,4	1,6	18406,00
10	0,07	0	700	28,5	38,8	30,7	2	16110,75

На основе статистических экспериментальных данных, полученных во время выполнения работы, была получена нейросетевая математическая модель. Погрешность вычислений составляла около 12 %. Эта модель эмитирует работу блока для исследования процессов пиролиза органической части ТБО в существующем во время замеров диапазоне варьирования параметров, влияющих на состав пиролизного газа. Ее использование позволило получить зависимости компонентов

пиролизного газа от влажности ТБО, массы ТБО и температуры ТБО (рис. 2, 3).

Данные зависимости получены в диапазоне следующих варьируемых параметров (табл. 2).

Таблица 2. Диапазон варьируемых параметров, влияющих на состав пиролизного газа

Параметры	Единицы измерения	Диапазон варьирования
Масса ТБО	кг	0,07
Влажность ТБО	%	0 ÷ 20
Температура ТБО	°С	200 ÷ 850
Количество CO ₂	%	14,64 ÷ 70
Количество CO	%	6,79 ÷ 82
Количество CH ₄	%	0,68 ÷ 78
Количество H ₂	%	0 ÷ 2,5
Теплотворная способность пиролизного газа	кДж/м ³	4009,71 ÷ 28841,52

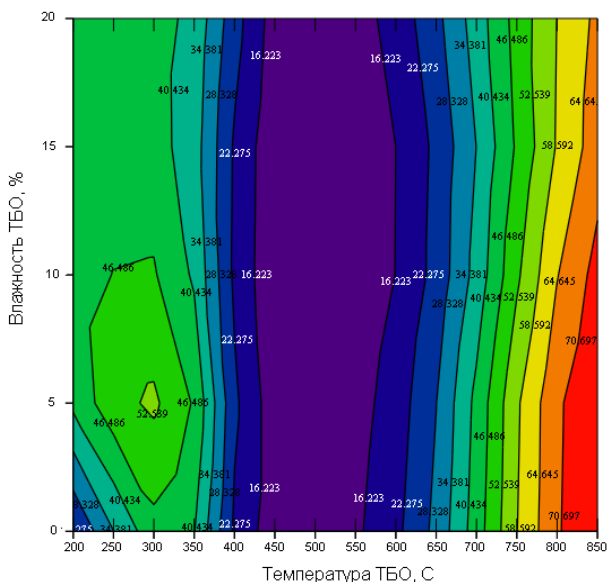


Рис. 2. Зависимость выхода CO от влажности и температуры ТБО

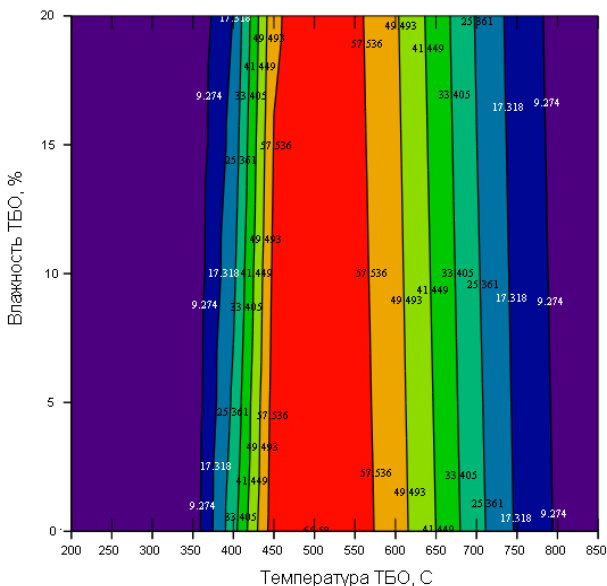


Рис. 3. Зависимость выхода CH_4 от влажности и температуры ТБО

В результате использования математической модели на основе нейросетевых технологий пиролизный газ с наивысшей теплотворной способностью получается при температуре ТБО от 470°C до 570°C и влажности ТБО около 10% в следующем составе: $\text{CO}_2 = 25\%$; $\text{CO} = 16\%$; $\text{CH}_4 = 58\%$; $\text{H}_2 = 1\%$. Теплотворная способность пиролизного газа составляет $4009,71 \div 28841,52 \text{ кДж/м}^3$.

Е.С. Семин, инж., О.И. Горинов, канд. техн. наук
(кафедра энергетики теплотехнологий и газоснабжения)

Определение эффективной теплоты и предельной влажности в процессе газификации твердого углеродистого остатка в технологии термического разложения ТБО

В зоне газификации происходит газификация твердого углеродистого остатка, поступившего из зоны пиролиза, и смешение пиролизных газов, газов газификации и остаточных газов от продуктов горения. Смешанный газ является генераторным газом.

Экспериментальные исследования показывают, что в продуктах пиролиза твердый углеродистый остаток составляет 25–30% и для про-

цесса его газификации потребуются окислительные газы CO_2 и H_2O , содержащиеся в продуктах пиролиза.

Газификация углерода твердого углеродистого остатка осуществляется одновременно четырьмя восстановительными реакциями, различающимися происхождением и видом окислительного газа:

- газификация двуокисью углерода пиролизного газа $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$;
- газификация парами воды из зоны подсушки (жизка и влага сырья) $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}$;
- газификация двуокисью углерода продуктов горения $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$;
- газификация водяными парами продуктов горения $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}$.



Рис. 1. Схема газификации

Газ процесса газификации содержит помимо прямых основных горючих составляющих CH_4 , H_2 и CO еще и балластные остаточные газы от горения – азота, воздуха, N_2 , и излишки CO_2 и H_2O . Анализируя тепловые процессы, происходящие в зоне пиролиза и зоне газификации, можно сделать важный вывод, что генераторный газ имеет наивысшую теплотворную способность, а следовательно, наивысшее качество при температурном режиме, когда процесс пиролиза осуществляется при температуре t_2 , которую обеспечивает тепловая энергия от частичного сжигания генераторного газа. В этом случае двуокись углерода продуктов горения полностью уходит на газификацию и не является балластом. Излишки или остаточные водяные пары процесса газификации, попадающие в генераторный газ, впоследствии могут быть сконденсированы.

Восстановительные реакции газификации, углерода ТУО идут с поглощением тепловой энергии. Сумму тепловых эффектов с учетом их долей в газогенерации представляет эффективная совокупная теплота газификации $Q_{y\delta}^{\bar{a}}$.

Тепловая энергия, необходимая на процессы восстановления окислительных газов CO_2 и H_2O до CO и H_2 посредством углерода, твердого углеродистого остатка, очевидно, будет складываться из энергии восстановления CO_2 и энергии восстановления H_2O .

$$Q_{y\delta}^{\bar{a}} = Q_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^{y\delta} + Q_{\text{I}\bar{2}\bar{\text{I}}}^{y\delta}, \quad (1)$$

где $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0,102 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ – суммарный тепловой эффект реакций восстановления

ний CO_2 , кДж/кгТБО; $Q_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^{y\delta}$ – суммарный тепловой эффект реакции восстановления H_2O , кДж/кгТБО.

$$Q_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^{y\delta} = \sum_{i=1}^n \mu_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^i \cdot \Delta H_{\text{N}\bar{\text{I}}_2} \quad (2)$$

$$Q_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}}^{y\delta} = \sum_{i=1}^n \mu_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}}^i \cdot \Delta H_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}} \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n \mu_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^i = \frac{G_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}^i}{G_{\text{O}\bar{\text{A}}\bar{\text{I}}}}; \sum_{i=1}^n \mu_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}}^i = \frac{G_{\text{I}\bar{2}\bar{\text{I}}}^i}{G_{\text{O}\bar{\text{A}}\bar{\text{I}}}}$ – приведены массовые доли со-

ответственно двуокиси углерода и водяных паров в продуктах пиролиза и горения; $\Delta H_{\text{N}\bar{\text{I}}_2}$ è $\Delta H_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}}$ – тепловой эффект реакции восстановления соответственно двуокиси углерода и паров воды с углеродом твердого углеродистого остатка, кДж/кг-углерода.

$$\Delta H_{\text{N}\bar{\text{I}}_2} = 14650 \text{ èÄæëä- óæåðí àà}$$

$$\Delta H_{\text{H}\bar{2}\bar{\text{I}}} = 11066,67 \text{ èÄæëä- óæåðí àà}$$

Для определения величины эффективной теплоты газификации $Q_{y\delta}^{\bar{a}}$ требуется знать содержание CO_2 и H_2O в пиролизных газах, в продуктах подсушки и продуктах горения, что не всегда возможно, поскольку выход этих газов зависит от многих параметров, в том числе, от морфологического состава сырья, его влажности, температуры пиролиза, производительности и т.д. Величину $Q_{y\delta}^{\bar{a}}$ можно оценить, предполагая, что процесс газификации ТУО осуществляется окислительными газами, полученными только в процессах пиролиза и подсушки, т.е. эти газы полностью без остатка прореагируют с углеродом твердого углеродистого остатка. В этом случае ТБО должны обладать какой-то определенной влажностью, которую можно назвать предельной $\mu_{w\bar{\text{I}}\delta}^0$. При $\mu_w^0 > \mu_{w\bar{\text{I}}\delta}^0$ в продуктах подсушки будут излишки H_2O , не востребованные в процессе газификации.

При $\mu_w^0 < \mu_{w\bar{\text{I}}\delta}^0$ для процесса газификации будет нехватка H_2O .

Для ТБО среднего морфологического состава имеем $\mu_{w \text{ i } \delta}^0 = 0,072$; $\mu_{Ni \text{ i } 2}^{\bar{a}} = 0,094$; $\mu_w^1 = 0,72$; $\mu_{\infty}^1 = 0,23$, эффективная теплота газификации выразится:

$$Q_{\bar{y}}^{\bar{a}} = \mu_{Ni \text{ i } 2}^{\bar{a}} \cdot \Delta H_{Ni \text{ i } 2}^{\bar{a}} + \mu_w^1 \cdot \Delta H_{\text{ i } 2}^1 + \mu_{\infty}^1 \cdot \Delta H_{\text{ i } 2}^1$$

В результате исследования определена предельная влажность ТБО $w_{пр} = 7,2\%$, выражена эффективная теплота газификации.

А.К. Гаськов, асп., В.В. Бухмиров, д-р техн. наук
(кафедра теоретических основ теплотехники)

Исследование современных методов энергосбережения на объектах промышленности и ЖКХ

В рамках инновационной научной работы были исследованы два современных метода энергосбережения:

- 1) энергосберегающие покрытия;
- 2) технология «XPlate».

Исследование энергосберегающих покрытий (теплозащитных красок) было выполнено экспериментально с целью определения температуры поверхности теплозащитной краски, нанесенной слоем 2,5 мм на паропровод $\varnothing 108$ мм с температурой пара 160°C. Температура поверхности теплозащитной краски определялась двумя способами:

1) контактным – при помощи поверенного цифрового термометра «COMARK». Датчики термометра крепились к поверхности паропровода и ТК при помощи термомасты КРТ-8 для устранения зазоров между поверхностями контакта;

2) бесконтактным – при помощи поверенного инфракрасного термометра (пирометра) «THERMOPPOINT». Пирометр визировался на поверхности полоски алюминиевой фольги, прикрепленной к поверхности краски термометра КРТ-8. Наружная поверхность фольги была предварительно заклеена для настройки пирометра на степень черноты сажи.

На основании экспериментальных данных была проведена предварительная оценка коэффициента теплопроводности теплозащитной краски. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета коэффициента теплопроводности теплозащитной краски

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициент теплопроводности по результатам измерения температуры стенки теплозащитной краски методом №1, Вт/м·°C	λ_{TK1}	0,056
Коэффициент теплопроводности по результатам измерения температуры стенки теплозащитной	λ_{TK2}	0,041

Расчет показывает, что найденное по экспериментальным данным значение коэффициента теплопроводности теплозащитной краски в ~50 раз превышает значение, заявленное производителем на уровне 0,001 Вт/м·°С. Результаты исследования энергосберегающего покрытия изложены в работе [1].

Исследование эффективности применения технологии «XPlate» проводилось экспериментально на двух котлах КВа-1,0Гн «Факел-Г» котельной санатория «Зеленый Городок» Ивановской области.

Во время эксперимента проведены измерения состава уходящих газов после котла переносным газоанализатором «Quintox» и измерения расхода теплоносителя через котельные агрегаты портативным ультразвуковым расходомером «Portaflow». При помощи газоанализатора определены следующие параметры:

- концентрация кислорода в уходящих газах;
- содержание оксида углерода в уходящих газах;
- содержание оксида азота в уходящих газах;
- суммарное содержание оксидов азота в уходящих газах в пересчете на оксид азота;
- содержание оксида серы в уходящих газах;
- температура уходящих газов;
- коэффициент избытка воздуха в точке замера;
- коэффициент полезного действия котельного агрегата.

Была проведена статистическая обработка экспериментальных данных, заключающаяся в нахождении средних значений измеряемых параметров до и после установки (снятия) пластин «XPlate».

Во время эксперимента перед каждой установкой или снятием пластин «XPlate» проводилось визуальное исследование пламени факела через смотровые щели котлов. Было отмечено, что при наложении пластины «XPlate» на улитку дутьевого вентилятора цвет пламени изменялся с тусклого голубого на яркий белый, что свидетельствует об изменении температуры факела, а следовательно, и теплового режима работы котлоагрегата. Для анализа данного явления необходимы дополнительные исследования.

На основе экспериментального исследования по определению эффективности применения технологии «XPlate» с целью сбережения энергетических ресурсов можно сделать следующие выводы:

1. Обработка и анализ результатов измерений не выявили однозначной зависимости влияния технологии «XPlate» на параметры, измеряемые в ходе эксперимента. Это может быть объяснено тем, что во время проведения эксперимента обнаружены значительные присосы воздуха в газовый тракт котла в стыковых швах газоходов котельных агрегатов. Присосы воздуха вносят существенную погрешность в измерение коэффициента избытка воздуха в топке котла и, соответственно, содержания кислорода в уходящих газах, а так же влияют на темпера-

туру уходящих газов. В условиях проведения эксперимента отсутствовала возможность оценки величины присосов воздуха в газовый тракт через неплотности газохода.

2. Отсутствие шиберов на всасе дутьевых вентиляторов горелок котлов и заваренные шиберы дымососов не позволили изменять соотношение «газ-воздух» в горелках и варьировать уровень разрежения в топке с целью уменьшения содержания свободного кислорода, участвующего в процессе горения.

3. Наложение пластины «XPlate» на улитку дутьевого вентилятора приводит к изменению цвета пламени, что свидетельствует об изменении температуры факела, а следовательно, и теплового режима работы котлоагрегата.

4. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что необходимо продолжить исследования технологии «XPlate» для проверки эффективности ее применения.

Результаты исследования технологии «XPlate» изложены в работе [2].

Список литературы

1. **Гаськов А.К., Бухмиров В.В., Орищенко Е.А.** Исследование энергосберегающих покрытий: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Состояния и перспективы развития электротехнологий» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – Т.2. – С. 164–165.

2. **Гаськов А.К., Бухмиров В.В., Данилов А.В.** Экспериментальное исследование технологии «XPLATE». Повышение эффективности энергетического оборудования: мат-лы VI Междунар. науч.-практич. конф. 6–8 декабря 2011 г. / под ред. А.В. Мошкарин. – Иваново, 2011. – С. 219–222.

Г.А. Родионов, асп., В.В. Бухмиров, д-р техн. наук
(кафедра теоретических основ теплотехники)

Энергосбережение при производстве строительных материалов и конструкций

Системы пневмотранспорта находят применение во многих отраслях промышленности (пищевая, химическая, производство строительных материалов и т.д.). Этому способствует ряд существенных достоинств данного вида транспортирования: низкие потери транспортируемого материала, высокая производительность установок и т.д. Однако, существенным недостатком систем пневмотранспорта является их высокая энергоемкость. Повышение энергетической эффективности систем пневмотранспорта является актуальной проблемой.

Анализ различных систем пневмотранспорта показал, что удельные затраты на транспортировку материалов составляют от 0,06 до

0,7 кВт·ч/т·м, что в среднем превышает энергоемкость ленточных транспортеров в 15–30 раз.

Одним из способов снижения энергоемкости систем пневмотранспорта может быть изменение термодинамических параметров транспортирующей среды (воздуха). Повышение температуры воздуха может повлиять на снижение требуемой производительности компрессора за счет увеличения удельного объема воздуха после него.

Исходя из сказанного, предложено учитывать влияние температуры воздуха на эффективность работы пневмотранспортной установки. Для повышения энергоэффективности работы уже существующих установок предлагается увеличивать температуру воздуха за счет использования теплоты сжатия воздуха, либо использовать теплоту охлаждающей воды от концевых и промежуточных охладителей. При этом производительность компрессора можно увеличить более чем на 20 % [1].

В момент пуска пневмотранспортной установки происходят сложные нестационарные процессы псевдооживления сыпучего материала. Высокие энергетические затраты на транспортировку материала в момент пуска пневмонасоса связаны в основном со следующими явлениями:

- большая часть внутренней энергии воздуха затрачивается на псевдооживление сыпучего материала;
- образование «пробок» из материала вследствие низкой скорости движения сыпучего материала в выходном патрубке материала;
- сверхвысокие концентрации твердой фазы на разгонном участке, что значительно увеличивает потери на трение и лобовое сопротивление движению частиц материала;
- затраты воздуха на заполнение материалопроводов.

Эту проблему можно решить, уменьшая концентрацию на входе в материалопровод в момент пуска за счет увеличения времени образования пылегазовой смеси, или повышения скорости потока на входе в пневмопровод.

В качестве метода исследования систем пневмотранспорта был выбран метод математического моделирования в среде Fluent Ansys [2]. Исследуя процессы псевдооживления при помощи ПВК Fluent можно с высокой точностью провести множество испытаний систем пневмотранспорта без проведения экспериментальных работ. Это позволит выявить наиболее эффективные режимы работы и разработать модель функционирования системы пневмотранспорта, которая учитывает основные физические процессы в двухфазном движущемся потоке и при этом легко алгоритмируется.

Описание движения пылегазового потока основано на решении системы дифференциальных уравнений движения (Навье-Стокса) и сохранения энергии текущей среды (Фурье-Кирхгофа) методом Эйлера:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho\vec{v}\Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi}\text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; \vec{v} – вектор скорости, м/с; Γ_Φ – коэффициент переноса переменной Φ ; S_Φ – источниковый член для переменной Φ .

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\zeta \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \delta_{i,k} \right) \quad (2)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости (сдвиговая вязкость); ζ – «вторая вязкость», или объемная вязкость; $\delta_{i,k}$ – символ Кронекера.

Выбор метода Эйлера для решения задачи переноса вещества в системах пневмотранспорта объясняется тем, что он эффективнее метода Эйлера-Лагранжа для систем с равными объемами газа и сыпучего материала. Однако, при решении задачи методом Эйлера, требования к размеру расчетной сетки очень высокие, что значительно увеличивает время расчета.

При использовании метода Эйлера отдельно для каждой фазы решаются уравнения массы, количества движения и сохранения энергии. При описании движения частицы не рассматриваются по отдельности. В уравнениях движения учитывается межфазовая сила сопротивления и другие силы, наблюдаемые в многофазных дисперсных системах. В результате расчета определяют локальную скорость, температуру и объемную долю каждой фазы в жидкости.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.М. Пневмотранспорт // Теория и практика. – 2005.
2. Moaveni S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. – 2008.

И. Г. Кукукина

Учет инновационной составляющей энергосбережения в структуре топливно-энергетического баланса как средства стимулирования предприятий к повышению энергоэффективности производства

В настоящее время существует проблема качественного прогнозирования будущего развития энергетики на всех уровнях: муниципальном, региональном и федеральном. Так же основным недостатком системы существующих топливно-энергетических балансов (ТЭБ) является отсутствие отраслевого уровня и регламентированного единого методического подхода к их разработке.

Для того чтобы построить качественные взаимосвязанные прогнозы, нужен интегрированный топливно-энергетический баланс, который бы давал возможность системно видеть будущее развития региона.

Так, например, уже в 2009 году в рамках проекта Европейского Союза ТАСИС «Привлечение инвестиций в энергосберегающие проекты регионов России» энергетическую ситуацию в трех российских регионах решено было представить на основе модели единого топливно-энергетического баланса (ЕТЭБ), интегрирующего балансы производства и потребления отдельных энергоносителей. Отчеты ЕТЭБ были подготовлены для Ростовской, Свердловской, Тверской областей с учетом влияния энергопотребления на экологию и безопасность ТЭК.

Главной задачей проекта являлось проведение анализа эффективности использования энергоресурсов в разных секторах российских регионов на основе балансового метода, а также выявление и статистическая оценка индикаторов энергоэффективности [1].

В связи с переходом к рыночной экономике и изменением форм собственности в народном хозяйстве, резко снизился организационно-технический уровень энергетического комплекса в промышленности. Это связано с резким снижением объема производства, невостребованностью мощностей, определенной анархией при переходе к другой форме собственности.

По данным Минпромэнерго, существующий потенциал энергосбережения в РФ составляет 360–430 млн т у.т., или около 40–45% текущего потребления энергии, из них 32% сосредоточены в промышленности [2].

Определение потенциала энергосбережения для конкретных объектов и отраслей промышленности следует производить на основе балансового метода. Определять резервы энергосбережения необходимо на основе всестороннего энергетического обследования энергохозяйства.

В соответствии с Указом Президента РФ была принята к исполнению основная целевая установка: снижение энергоемкости ВВП к 2020 году на 40% по отношению к 2007 году.

В настоящей работе сделана попытка оценить возможности выполнения поставленной задачи на примере текстильной отрасли, как одной из наиболее энергоемких отраслей в Ивановском регионе.

Сегодня Ивановская область – ведущий регион в Российской Федерации по производству хлопчатобумажных, льняных, а также шерстяных тканей. В области насчитывается более 70 текстильных предприятий, из них 9 градообразующих [3]. На рис. 1.1–1.2 приведена динамика потребления топливно-энергетических ресурсов за 7 лет по текстильным предприятиям Ивановского региона:

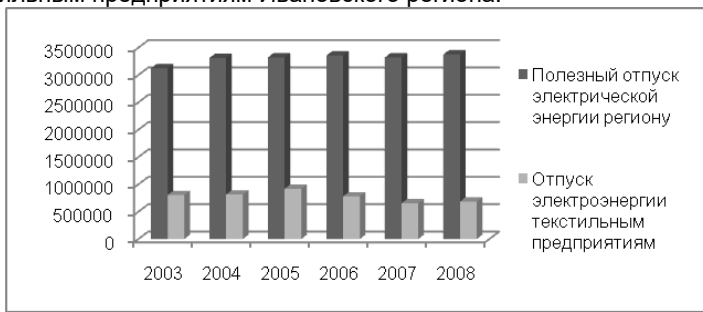


Рис. 1.1. Потребление электроэнергии текстильными предприятиями в разрезе региона, тыс.кВт-ч

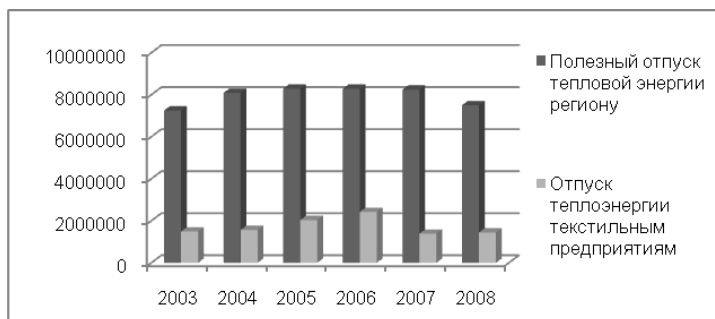


Рис. 1.2. Потребление тепловой энергии текстильными предприятиями в разрезе региона, Гкал

Источник: информационная аналитическая система (ИАС) отдел ТЭБ ДЭРИТ.

Доля потребления энергоресурсов текстильной отрасли в разрезе промышленности региона составляет: по тепловой энергии 36%, по электрической энергии 21% (рис. 2.1, 2.2).

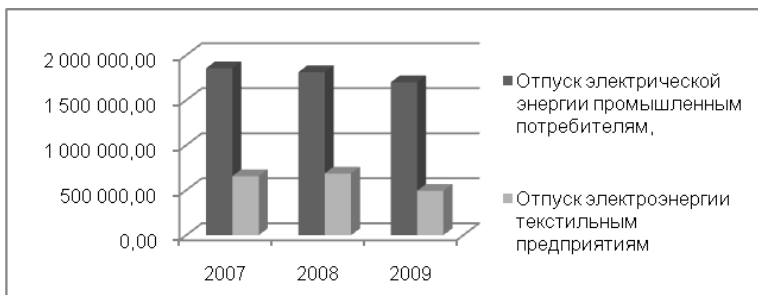


Рис. 2.1. Потребление электроэнергии текстильными предприятиями в разрезе промышленности, тыс. кВт-ч

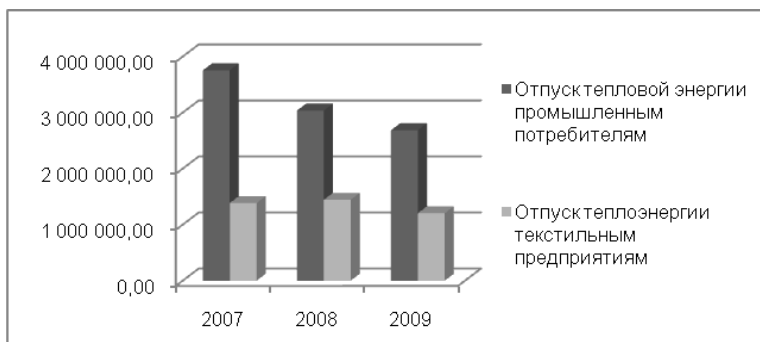


Рис. 2.2. Потребление тепловой энергии текстильными предприятиями в разрезе промышленности, Гкал

Источник: информационная аналитическая система (ИАС) отдел ТЭБ ДЭРИТ.

Анализ современного состояния текстильной отрасли и итогов ее деятельности за 2000–2010 годы с учетом мирового финансового кризиса 2008 г. показал, что, несмотря на наличие положительных тенденций в развитии текстильной отрасли в целом по стране, и в частности, в Ивановском регионе, все еще имеют место системные проблемы, требующие скорейшего решения. Так, например, помимо высокой энергоемкости производства, морального и физического износа основных производственных фондов (ОПФ), отсутствия на многих предприятиях современных энергосберегающих технологий и низкого коэффициента обновления ОПФ (3–5 % в год, против 14–16 % в экономически развитых странах) так же отмечается недостаточный уровень инновационной и инвестиционной деятельности отрасли, отражающийся на слабой конкурентоспособности отечественных товаров, низкой доле инновационной продукции, НОУ-ХАУ. Все это приводит к снижению имиджа от-

расли и формированию негативного отношения к российским товаропроизводителям на мировом рынке. Причины возникновения проблем:

- недостаточный для модернизации и реструктуризации производства уровень инвестиций;
- отсутствие инвестиций для внедрения «прорывных» инновационных и инвестиционных проектов;
- необоснованный рост цен производителей на продукцию текстильного и швейного производства.

О некотором ухудшении в деятельности легкой промышленности в 2008 году свидетельствует повышение доли убыточных предприятий и низкий уровень использования производственных мощностей [4].

Уровень использования производственных мощностей в основных отраслях характеризуется следующими показателями: хлопчатобумажная – 70,1 %, льняная – 35,9 %. В условиях ежегодного роста производственных затрат недоиспользование производственных мощностей приносит отрасли убытки и формирует нерациональную структуру ее баланса, в котором внеоборотные активы занимают около 90 процентов.

В результате влияния всех негативных факторов к 2011 г. произошло сокращение производства хлопчатобумажных тканей и пряжи в два раза по сравнению с докризисным временем и, как следствие этого, сокращение объемов производства домашнего текстиля на 20 %. Кризис так же затормозил инвестиционные процессы в текстильной отрасли (рис. 3.1–3.4).



Рис. 3.1



Рис. 3.2



Рис. 3.3

Рис. 3.4

Источник: Росстат, текстильный холдинг «Мега».

Таким образом, текстильная промышленность характеризуется низкими показателями эффективности использования энергоресурсов и соответственно высокими технологическими затратами тепловой и электрической энергии, поэтому отрасль располагает большим потенциалом энергосбережения и значительными возможностями по резкому снижению энергопотребления.

Для того чтобы определить скрытый потенциал проводятся обязательные энергетические обследования и разрабатываются мероприятия по энергосбережению. Законом «Об энергосбережении», на положениях которого строится Энергетическая стратегия в нашей стране, предусмотрен целый ряд типовых энергосберегающих мероприятий, рекомендуемых для отдельных секторов экономики (промышленное производство, коммунально-бытовой сектор, бюджетные организации) (табл. 1). Примером могут служить теплоизоляционная защита зданий, установка приборов учета потребления энергоресурсов, изоляция трубопроводов, замена осветительных ламп накаливания на энергосберегающие, регулирование напряжения, оптимизация загрузки трансформаторов и т.п.

Проведенные обследования показали, что при выполнении комплекса рекомендованных энергосберегающих мероприятий достигаются недостаточно высокие показатели снижения энергопотребления от 5 до 20%.

Таблица 1. **Типовые энергосберегающие мероприятия**

Наименование мероприятия по энергосбережению	Эффективность
1. Оснащение предприятий современными приборами учета коммунальных ресурсов и устройствами регулирования потребления тепловой энергии, замена устаревших счетчиков на счетчики повышенного класса точности	20%
2. Применение новых теплоизоляционных материалов	15%
3. Внедрение устройств по компенсации реактивной мощности	3%
4. Внедрение автоматизированной системы коммерческого учета тепловой и электрической энергии	10%
5. Внедрение энергосберегающих светильников и систем автоматического включения/выключения и регулирования яркости освещения	5%

Вместе с тем для достижения более высоких показателей экономии энергоресурсов, в основном, в промышленном производстве, необходимо выявлять и использовать скрытый потенциал энергосбережения, который присутствует в энергоемком производстве. Данный потенциал может быть успешно реализован на основе использования эффективных научных разработок и изобретений, направленных на совершенствование технологических процессов, совмещение технологических операций, использования вторичных энергоресурсов. В табл. 2 приведены примеры инновационных энергосберегающих проектов для предприятий текстильной отрасли.

Таблица 2. **Инновационные энергосберегающие мероприятия**

Наименование мероприятия по энергосбережению	Эффективность
1. Оборудование и технологии высокотемпературной обработки ткани с использованием техники инфракрасного нагрева	Экономия электроэнергии 50% (65 кВт·ч)
2. Оборудование и технология для энергосберегающей пропитки ткани при заключительной отделке	Экономия пара на сушку ткани 70%
3. Оборудование для утилизации теплоты паровоздушных выбросов от сушильных машин и зрельников	Возвращение в технологический цикл производства до 70% теплоты
4. Рационализация систем конденсатоудаления от пароиспользующего оборудования	Сокращение потерь пара через конденсатные сети на 10–15%
5. Оптимизация работы систем воздухоудаления из сушильного оборудования	Экономия пара 20–25%
6. Совмещенная технология промывки и сушки ткани с аппретированием и термофиксацией на одной поточной линии	Экономия пара на сушку ткани 70%

Анализ показывает, что в случае использования в производстве высокоэффективных инновационных разработок и изобретений, достигается резкое снижение потребления энергоносителей на агрегатах и технологических линиях: электроэнергии на 30–40%, тепловой энергии в 2,5–3 раза, воды на 50%.

Сокращение потребления энергоресурсов в результате внедрения инновационных энергосберегающих проектов и снижения потребления энергоносителей будет оказывать существенное влияние на топливно-энергетический баланс как отдельных промышленных предприятий, так и региона в целом.

При разработке перспективных ТЭБ должны учитываться изменения в потреблении различных видов энергетических ресурсов, которые происходят в связи с перевооружением производства и его технической модернизацией, изменением структуры выпускаемой продукции за счет внедрения энергосберегающих проектов. В настоящее время в ТЭБ не отражается величина экономии энергоресурсов от реализации энергосберегающих проектов (мероприятий), которая играет важную роль в снижении потребления того или иного энергоресурса. Поэтому нельзя оценить работу каждого потребителя энергоресурсов в области энергосбережения.

В связи с этим мы считаем целесообразным при составлении отчетной годовой формы ТЭБ в его расходной части ввести показатель, отражающий экономию энергоресурсов за счет внедрения типовых и инновационных энергосберегающих мероприятий. И тогда общее потребление энергоносителей будет рассчитываться по следующим формулам:

Общее потребление электрической энергии:

$$W_{\text{общ}} = W_{\text{общ}}^{\text{пол}} + W_{\text{пот}} - W_{\text{экон}} \quad [\text{млн кВт} \cdot \text{ч}], \quad (1)$$

где $W_{\text{общ}}^{\text{пол}}$ – полезное использование электроэнергии, млн кВт·ч; $W_{\text{пот}}$ – потери от нерационального использования электроэнергии, млн кВт·ч; $W_{\text{экон}}$ – экономия энергоресурсов за счет внедрения типовых и инновационных энергосберегающих мероприятий, млн кВт·ч.

В переводе на условное топливо:

$$T_{\text{общ}}^W = T_{\text{общ}}^{\text{пол}} + T_{\text{пот}}^W - T_{\text{экон}}^W \quad [\text{тыс. т. у. т.}], \quad (2)$$

Общее потребление тепловой энергии:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{общ}}^{\text{пол}} + Q_{\text{пот}} - Q_{\text{экон}} \quad [\text{тыс. Гкал}], \quad (3)$$

где $Q_{\text{общ}}^{\text{пол}}$ – полезное использование тепловой энергии, тыс. Гкал; $Q_{\text{пот}}$ – потери от нерационального использования тепловой энергии,

тыс. Гкал; $Q_{\text{экон}}$ – экономия энергоресурсов за счет внедрения типовых и инновационных энергосберегающих мероприятий, тыс. Гкал.

В переводе на условное топливо:

$$T_{\text{общ}}^Q = T_{\text{общ}}^{Q_{\text{пол}}} + T_{\text{пот}}^Q - T_{\text{экон}}^Q \quad [\text{тыс. т. у. т.}] \quad (4)$$

Потенциал энергосбережения будет определяться через величину потерь от нерационального использования электрической и тепловой энергии: $W_{\text{пот}}$ – [млн кВт.ч], $Q_{\text{пот}}$ – [тыс.Гкал], которые в свою очередь являются в процессе энергетического обследования предприятий.

В переводе на условное топливо:

$$T_{\text{т.у.т.}}^W = W_{\text{т.у.т.}} \times \frac{0,86}{7} \quad [\text{млн кВт.ч}], \quad (5)$$

$$T_{\text{т.у.т.}}^Q = Q_{\text{т.у.т.}} \times \frac{1}{7} \quad [\text{тыс.Гкал}] \quad (6)$$

Тогда полезное использование электрической и тепловой энергии можно будет представить в следующем виде:

$$W_{\text{общ}}^{\text{пол}} = W_{\text{общ}} - W_{\text{пот}} \quad [\text{млн кВт.ч}], \quad (7)$$

$$T_{\text{т.у.т.}}^{W_{\text{т.у.т.}}^{\text{пол}}} = T_{\text{т.у.т.}}^W - T_{\text{т.у.т.}}^W \quad [\text{млн кВт.ч}], \quad (8)$$

$$Q_{\text{общ}}^{\text{пол}} = Q_{\text{общ}} - Q_{\text{пот}} \quad [\text{тыс.Гкал}], \quad (9)$$

$$T_{\text{т.у.т.}}^{Q_{\text{т.у.т.}}^{\text{пол}}} = T_{\text{т.у.т.}}^Q - T_{\text{т.у.т.}}^Q \quad [\text{тыс.Гкал}]. \quad (10)$$

Данный подход дает возможность оценить эффективность работы предприятия (организации) в области энергосбережения, повышения энергетической эффективности производства, использования инновационных решений и исполнения требований закона в рамках заданной программы снижения энергоемкости ВВП на 40 %.

В дальнейшем данную методику можно будет развить с целью охватить потенциал повышения энергетической эффективности во всех отраслях региона, включая и сферу жилищно-коммунального хозяйства, которая в настоящее время отличается наиболее высокими темпами роста электропотребления.

Список литературы

1. **Башмаков И.А.** Топливо-энергетический баланс как инструмент анализа, прогноза и индикативного планирования развития энергетики // Энергетическая политика. – 2007. – Вып. 2. – С. 20–25.

2. **Михаилов С.А., Гордукалов А.А.** «Наступление» на проблему повышения энергоэффективности // Мировая Энергетика. – 2008 (январь). – С. 42–47.

3. **Постановление** правительства Ивановской области № 236-п от 08.07.2010 г. Об утверждении региональной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Ивановской области на 2010–2020 годы».

4. **Стратегия** развития Легкой промышленности на период до 2020 года.

В.Д. Лебедев

Моделирование элементов цифровых измерительных трансформаторов

Работа посвящена созданию нового класса высоковольтного энергетического оборудования – микропроцессорных трансформаторов тока и напряжения 10 кВ (в перспективе 35–220 кВ), не имеющих аналогов, выпускаемых в Российской Федерации.

В настоящее время ток и напряжение в ЛЭП и на подстанциях измеряют с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения, выполненных преимущественно на электромагнитном принципе. Метрологические характеристики индуктивных трансформаторов ухудшаются в переходных режимах, что не позволяет надежно и точно контролировать качество электроэнергии.

Существующие трансформаторы тока и напряжения предназначены для работы с аналоговыми устройствами контроля и учета электроэнергии и релейной защиты. Анализ трансформаторов тока и напряжения в сетях 6–10 кВ показывает, что более 50 % из них не обеспечивают свой метрологический класс точности из-за перегрузки по вторичным цепям. В тоже время существующие трансформаторы тока имеют искажения формы сигналов в переходных режимах, особенно во время коротких замыканий. Из-за насыщения сердечников трансформаторы тока передают недостоверную информацию о токах коротких замыканий, приводя к задержкам и неселективной работе релейной защиты и автоматики.

Конструкции традиционных трансформаторов тока и напряжения не исключают коммерческих потерь, обусловленных низким классом точности и возможностью хищения электроэнергии.

Одним из перспективных направлений развития электроэнергетики является направление построения «цифровых» подстанций. Такой подход дает следующие основные преимущества перед традиционными подстанциями:

- единый источник информации в стандартном формате для всех информационных и управляющих устройств;
- простое подключение новых устройств, неограниченное количество получателей данных;
- высокая точность и единство измерений;

- помехозащищенность (использование оптоволокну для передачи информации от РУ);
- снижение количества кабельных связей;
- мониторинг и диагностика всех составляющих подстанции, включая вторичные цепи;
- упрощение и гибкость проектирования и наладки.

«Цифровая» подстанция строится на основе интегрированных цифровых систем измерения, защиты и управления с применением цифровых трансформаторов тока и напряжения [1, 2] и цифровых схем управления. Микропроцессорный трансформатор тока и напряжения обеспечивает автоматизацию подстанций с применением современных средств диагностики, мониторинга и управления на основе информационных и компьютерных технологий.

Исходя из перечисленных преимуществ, создание МТТН 10 кВ, осуществляющего преобразование напряжений и токов в цифровой код и передачу измерений на щит управления по оптическому кабелю, является актуальной задачей.

Структурная схема одного канала измерительного преобразователя приведена на рис. 1. Пропускная способность цифрового канала позволяет передавать информацию о токе с нескольких датчиков в режиме реального времени.

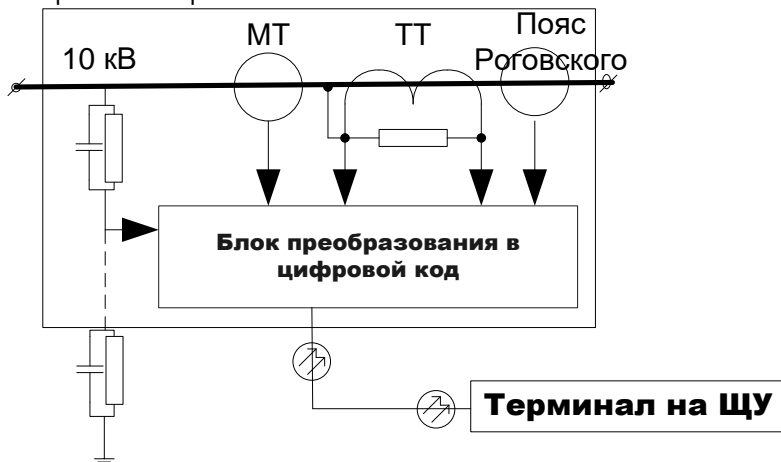


Рис. 1. Структурная схема одного канала измерительного преобразователя

Для целей коммерческого учета и для целей измерения предполагается использование трансформатора тока (ТТ), нагруженного на сопротивление, в котором отсутствует высоковольтная изоляция, что позволяет повысить класс точности трансформатора. Высокий класс точности ТТ (от 0,2s до 0,1s), сопоставимый с классом точности лабораторных трансформаторов, также обусловлен:

- применением магнитопровода, изготовленного из нанокристаллического ферромагнитного материала;
- минимальной (абсолютно согласованной) нагрузкой трансформатора в виде электронного блока АЦП.

Магнитотранзисторное кольцо (МТ) в составе МТТН предназначено для измерения токов в переходных и аварийных режимах с целью снабжения информацией релейной защиты и автоматики. Магнитотранзисторное кольцо работает в линейном диапазоне с токами короткого замыкания высокой кратности и осуществляет преобразование тока в широком спектре частот, включая постоянную составляющую.

Пояс Роговского предназначен для измерения токов в рабочих и переходных режимах. Сердечник пояса Роговского выполнен из неферромагнитного материала, что обеспечивает линейное преобразование токов больших кратностей.

Преобразование напряжения осуществляется с использованием антирезонансных первичных преобразователей с классом точности не ниже 0,2.

При разработке трансформаторов одним из основных является вопрос расчета полей. Для выполнения таких расчетов наилучшим образом подходят компьютерные программы на основе метода конечных элементов, такие как Elcut, ANSYS, Comsol Multiphysics [3]. В указанных пакетах можно выполнять расчеты тепловых, механических, электромагнитных полей и др.

Использование программы полевого моделирования Comsol Multiphysics открывает широкие возможности для анализа работы трансформаторов и расчета полей при решении задач исследования характеристик самих трансформаторов, а также решении вопросов электромагнитной совместимости. На основе моделирования методом конечных элементов, заложенного в программу, выполняя расчеты электромагнитных полей, можно определить параметры исследуемого трансформатора, наиболее важными из которых являются индуктивности обмоток.

В работе представлены две статические модели трансформатора, выполненные в форматах 2D и 3D, проведен сравнительный анализ и оценен уровень погрешностей в каждой из моделей.

Геометрия двумерной модели трансформатора (рис. 2) содержит магнитопровод 1, первичный провод 2, вторичную обмотку 3, границу расчетной области 4 и бесконечный элемент 5, моделирующий открытые границы расчетной области.

В режиме 3D моделирование осуществляется с большим числом конечных элементов и, как следствие, с большим числом степеней свободы в уравнениях. Поэтому для снижения требований к оперативной памяти компьютера необходимо учитывать симметрию и моделировать часть катушек, а также использовать бесконечные элементы [4]. Так, модель, изображенная на рис. 3, состоит из $\frac{1}{4}$ части магнитопровода – 1, $\frac{1}{4}$ части первичного провода – 2, $\frac{1}{4}$ части вторичной обмотки – 3 и

окружающего пространства с бесконечным элементом – 4, представляющим собой четверть сферы.

В статической модели, выполненной в режиме Statics, используется уравнение магнитного поля в геометрическом пространстве [4]:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}, \quad (1)$$

где ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; \vec{A} – векторный магнитный потенциал; \vec{J} – вектор плотности сторонних токов.

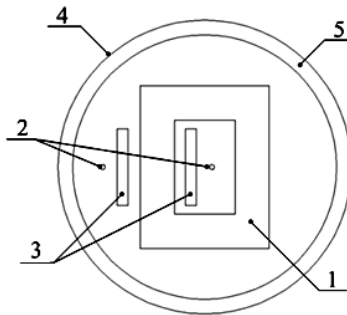


Рис. 2. Геометрия двухмерной модели трансформатора

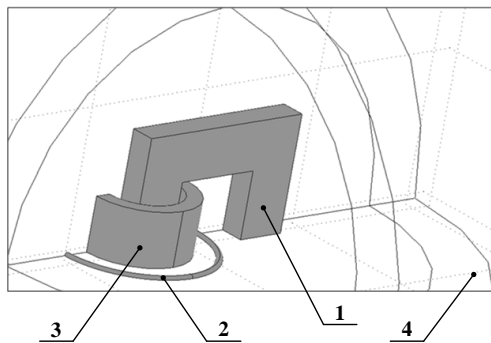


Рис. 3. Геометрия трехмерной модели трансформатора

В двухмерной модели вектор плотности тока $\vec{J} = (J_x, J_y, J_z)$ при соответствующем выборе осей координат содержит одну компоненту $\vec{J} = (0, 0, J_z)$, что соответственно приводит к исключению двух компонент векторного магнитного потенциала $\vec{A} = (0, 0, A_z)$. Теперь, ис-

пользуя скалярные переменные J и A вместо соответствующих векторов, уравнение (1) можно представить в виде уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = \mu\mu_0 J, \quad (2)$$

где $A = A(x,y)$ и $J = J(x,y)$.

Плотность тока, задаваемая в катушке, рассчитывается по формуле:

$$J = \frac{I \cdot N}{S}, \quad (3)$$

где I – сила тока, протекающего в катушке; N – число витков катушки; S – площадь поперечного сечения катушки.

Картина распределения магнитного поля, полученная в двумерной модели, приведена на рис. 4.

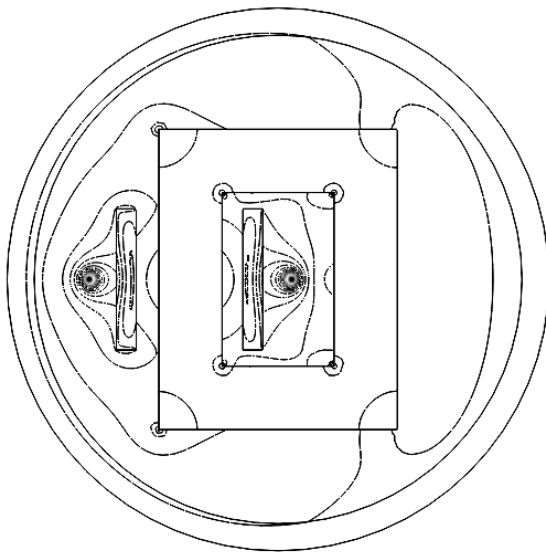


Рис. 4. Магнитное поле в двумерной модели трансформатора

В трехмерной модели плотность тока при соответствующем выборе системы координат (ось катушки совпадает с осью Y) задается по кругу в плоскости XZ [3, 5]:

$$J_x = -J \cdot \cos\left(\arctg \frac{x + x_{cm}}{z}\right); \quad J_y = 0; \quad J_z = -J \cdot \sin\left(\arctg \frac{x + x_{cm}}{z}\right). \quad (4)$$

Величина x_{cm} указывает на смещение оси катушки относительно глобальных координат модели.

Расчет в пространственно-временной области по уравнению:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \vec{A}) = J_z^e \vec{e}_z, \quad (5)$$

$$\vec{A} = A_z \cdot \vec{e}_z$$

потребляет значительные компьютерные ресурсы, особенно в 3D моделировании. В случае незначительного насыщения магнитопровода, пользуясь предположением, что токи, напряжения и другие компоненты поля сохраняют синусоидальность, можно использовать уравнение, записанное в пространственно-частотной области, которое имеет вид:

$$j\omega \sigma \cdot \vec{A} + \nabla \times (\mu^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \vec{A}) = J_z^e \vec{e}_z. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) в нелинейной постановке в программе Comsol сопровождается вычислительной неустойчивостью. Поэтому для учета зависимости магнитной проницаемости μ_r от величины магнитной индукции B выполнено совместное решение уравнений (6) и (1). Уравнение (1) решается в нелинейной постановке при сторонних токах, полученных из решения уравнения (6), а значения магнитной проницаемости μ_r , полученные из (1), используются в решении уравнения (6) в линейной постановке.

Для определения индуктивностей обмоток трансформатора по результатам расчетов поля в программе Comsol использована представленная ниже формула, как показывает практика расчетов, дающая приемлемую точность [6]:

$$L = \frac{1}{I^2} \frac{1}{2} \int_{V_J} \vec{J} \cdot \vec{A}_J dV_J, \quad (7)$$

причем направления векторов J и A_J определяются направлением намоток катушек трансформатора.

В двухмерной модели интеграл по объему в уравнении (7) заменяется интегралом по площади:

$$L = \frac{1}{I^2} \frac{1}{2} \int_{S_J} \vec{J} \cdot \vec{A}_J dS_J. \quad (8)$$

При расчетах индуктивностей используется скалярное произведение плотности тока и векторного магнитного потенциала. В трехмерной модели проекция векторного магнитного потенциала на компоненты векторов плотностей тока в обмотках определяется аналогично (4):

$$\vec{A}_J = -A_x \cos\left(\arctg\left(\frac{x + x_{cm}}{z}\right)\right) + A_z \sin\left(\arctg\left(\frac{x + x_{cm}}{z}\right)\right). \quad (9)$$

Значения индуктивностей катушек трансформаторов определены по уравнению:

$$L = \frac{1}{\mu_0} \int_{V_J} \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}_J dV = \frac{1}{\mu_0} \int_{V_J} (J_x \cdot A_x + J_z \cdot A_z) dV . \quad (10)$$

Результаты сопоставления расчетов, выполненных в форматах 2D и 3D, с физическим экспериментом показали приемлемую точность и перспективность использования разработанных методов расчета и анализа для исследования характеристик измерительных трансформаторов и решения вопросов электромагнитной совместимости.

Список литературы

1. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Изв. вузов. Электромеханика. Специальный выпуск. – 2010. – С. 98–99.
2. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35–42.
3. **Лебедев В.Д., Федотов С.П.** Разработка антирезонансного индуктивного трансформатора напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 102–105.
4. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А.** Определение параметров элементов антирезонансного трансформатора напряжения на основе компьютерного полевого моделирования (Методы моделирования и исследование вычислительных погрешностей) // Вестник научно-промышленного общества. – 2010. – Вып. 14. – С. 51–59.
5. **Долгих И.Ю.** Разработка и исследование физической модели канальной печи: мат-лы регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – Т. 3. – С. 120–123.
6. **Долгих И.Ю., Лебедев В.Д.** Математическое моделирование трансформатора в программе Comsol Multiphysics // Вестник научно-промышленного общества. – 2011. – Вып. 17. – С. 47–55.

Математические модели температурного поля в высоковольтных кабелях с экструдированной (СПЭ) изоляцияй

Актуальность. Одним из приоритетных направлений модернизации Российских электрических сетей является внедрение в использование кабелей «нового» поколения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Данный тип кабеля используют всюду, где невозможно или нежелательно построение воздушных линий электропередачи. Яркий тому пример: крупные города-мегаполисы, где прокладка воздушных ЛЭП очень затруднена из-за сформировавшейся архитектуры города.

Кабели из сшитого полиэтилена имеют большой список преимуществ по сравнению с устаревшими маслонаполненными кабелями, а именно: легкость и экологичность в эксплуатации, удобство монтажа, большие строительные длины, более высокие изоляционные свойства диэлектрического материала, но наряду с этим существуют и недостатки. Один из самых существенных – это отсутствие свойства изолирующего материала восстанавливаться после возникновения внутренних разрядов и пробоев, в результате чего быстро накапливается степень изношенности кабеля в процессе эксплуатации. С другой стороны, сшитый полиэтилен наряду с хорошими электроизоляционными свойствами обладает высоким термоизолирующим эффектом. Поэтому надежность и бесперебойность работы кабельной линии сильно зависит от температурного режима работы линии и внешних условий прокладки. Ввиду вышеизложенного актуален вопрос о выборе оптимального способа диагностики и прогнозировании остаточного ресурса использования находящихся в работе кабелей.

Одним из перспективных направлений в области диагностики высоковольтных КЛ является мониторинг температуры фаз кабеля по всей длине в реальном времени. Существующие технологии измерения распределенной температуры с помощью оптоволоконных датчиков позволяют определять величину температуры с точностью до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и разрешением $0,5\text{ м}$ (т. е. определяется среднее значение температуры на $0,5\text{ м}$ длины КЛ). Для осуществления мониторинга оптоволоконный датчик прикрепляется к кабельной линии в различных точках сечения (рис. 1, а – г) в зависимости от конфигурации линии и других факторов.

Но, поскольку сшитый полиэтилен обладает высоким температурным градиентом, температура наиболее нагретого участка сечения кабеля (вблизи жилы) будет резко отличаться от измеренной температуры. В результате, не удастся получить полное представление о распределении температуры по сечению кабеля. Кроме того, для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок КЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий, необходимо

прогнозирование изменения температуры кабеля. Поэтому существует необходимость исследования температурных процессов в сечении КЛ и создания быстродействующего алгоритма расчета температуры кабеля по сечению (рис. 2), позволяющего прогнозировать изменение температуры с учетом изменения нагрузки линии.

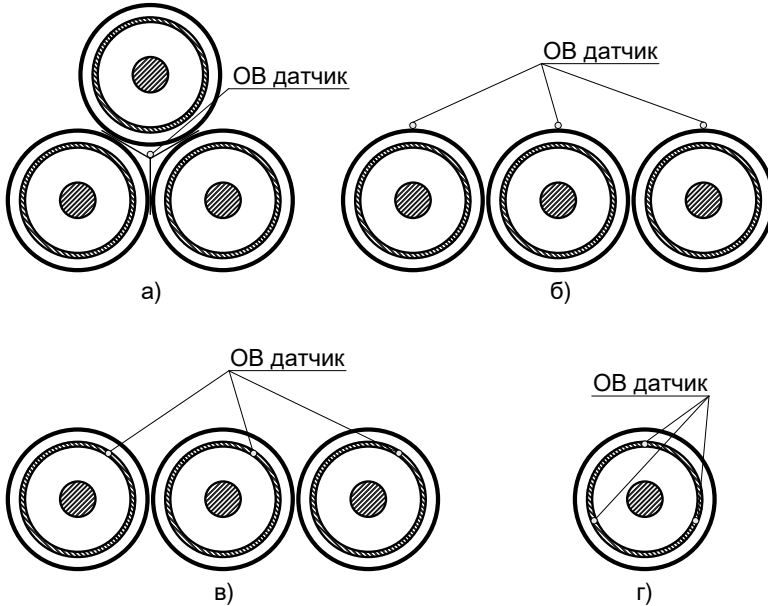


Рис. 1. Расположение оптоволоконного датчика в сечении КЛ

С этой целью были разработаны математические модели, позволяющие рассчитывать температуру в сечении кабеля в установившихся и переходных режимах, а так же создан алгоритм расчета изменения температуры во времени на основе одного из методов численно интегрирования.

Статическая модель температурного поля. Расчет распределения температуры КЛ выполняется в соответствии с теорией теплопроводности, используя дифференциальное уравнение Фурье.

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{1}{c\rho} q. \quad (1)$$

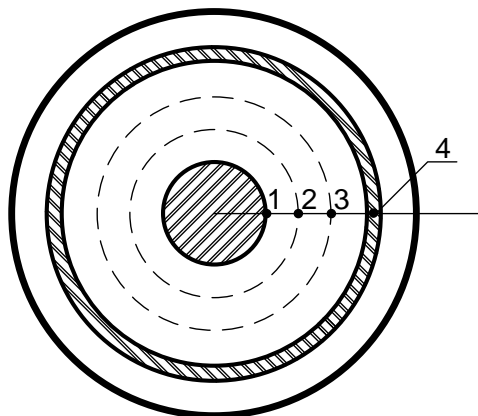


Рис. 2. Сечение одножильного кабеля с экструдированной изоляцией

При выполнении расчета кабеля в качестве исходных данных используем данные для кабеля фирмы АВВ, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Параметры кабеля

1. Токпроводящая жила	
– площадь поперечного сечения, $S_{ж}$	1000 мм ² ;
– диаметр проводящей жилы	37,9 мм;
– материал жилы	медь;
2. Основная изоляция	
– материал	XLPE (сшитый полиэтилен);
– наружный диаметр изоляции	Ø 87,1 мм;
– напряжение изоляции $U_{ф}/U_{н}/U_{т}$	127/220/245 кВ.
3. Экран	
– поперечное сечение/ толщина слоя/ диаметр	265мм ² / 1,78мм / Ø 94,9 мм
4. Наружная изоляция	
– материал	полиэтилен
– наружный диаметр изоляции	Ø 109 мм;

Примечание: в таблице приведены только основные элементы кабеля (не указаны тонкие промежуточные полупроводящие слои и влагозащитная тонкая алюминиевая оболочка).

Для проведения расчетов использовались физические параметры [2], представленные в табл. 2.

Таблица. 2. Физические свойства материалов и среды

	Электропроводность	Теплопроводность	Теплоемкость	Плотность
Медь	$\gamma_{Cu} = 5 \cdot 10^7$ (См/м) при $t = 80$ °С ($\rho_{Cu} = 0,2 \cdot 10^7$ Ом·м)	$\lambda = 400$ Вт/(м·К)	$c_{Cu} = 393$ Дж/(кг·К)	8920 кг/м ³
Полиэтилен		$\lambda = 0,235$ Вт/(м·К)	$c = 2350$ Дж/(кг·К)	930 кг/м ³
Грунт		$\lambda = 1,0$ Вт/(м·К)	$c_{гр} = 850$ Дж/(кг·К)	2000 кг/м ³

Допущения:

- Считаем, что плотность тока по сечению провода распределена равномерно (поверхностным эффектом пренебрегаем).
 - Кабель имеет идеальную цилиндрическую конструкцию. Окружающее пространство также обладает осевой симметрией.
 - Параметры кабеля и окружающей среды не меняются по его длине (плоскопараллельная симметрия). В этом случае тепло распространяется равномерно от оси кабеля к его поверхности и дальше в окружающую среду, при этом в результате процесса теплопередачи в сечении кабеля образуются изотермы, представляющие собой concentric окружности.
 - Температуру окружающей среды считаем постоянной.
- Результатом решения (1) являются графики распределения температуры по сечению кабеля (рис. 2) изображенные на рис. 3.

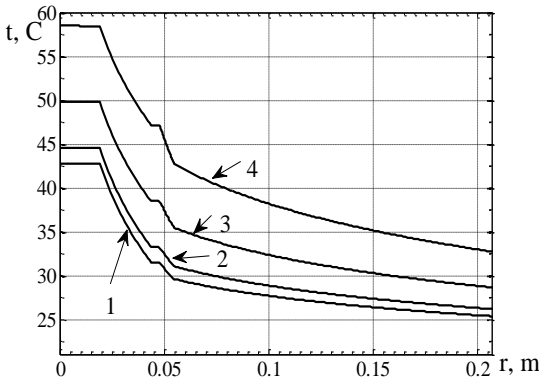


Рис. 3. Распределение температуры в сечении кабеля и окружающем пространстве при токах в экране: 1) $I_0 = 0$ А; 2) $I_0 = 200$ А, 3) $I_0 = 400$ А, 4) $I_0 = 600$ А

На приведенных графиках отчетливо видна слабая, почти нулевая, зависимость распределения температуры высокотеплопроводных элементов – жилы и экрана кабеля (горизонтальные полки на графиках). Как и предполагалось, в объеме изоляции из сшитого полиэтилена

наблюдается большой градиент температур, что приводит к существенной разнице температур экрана кабеля, где устанавливаются датчики температуры, и центральной жилы.

По результатам работы статической модели теплового режима кабеля видно, что при организации мониторинга температуры экрана или поверхности КЛ необходимо выполнить расчет самой жилы, т.к. при резком увеличении токовой нагрузки градиент температур будет еще больше, чем показано на рис. 3.

Динамическая модель тепловых процессов. Для определения переходных процессов в температурном поле кабеля была разработана динамическая модель кабельной линии путем построения электрической схемы замещения на основе электротепловой аналогии (рис. 4). Здесь источники тока J и J_1 замещают температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану кабеля, активные сопротивления $R_{пэ1} \dots R_{вн}$ – тепловые сопротивления тепловому потоку, емкости $C_1 \dots C_4$ – теплоемкости материалов кабеля, и окружающей среды (грунта). Источник $E_{вн}$ имитирует температуру окружающей среды. Потенциалы точек 1–4 на схеме эквивалентны температуре соответствующих точек в сечении кабеля на рис. 2.

$J_ж$ и $J_э$ предполагается рассчитывать с помощью интеграла Джоуля, а ЭДС $E_{вн}$ целесообразно определять на основе данных о температуре, полученных от оптоволоконных датчиков.

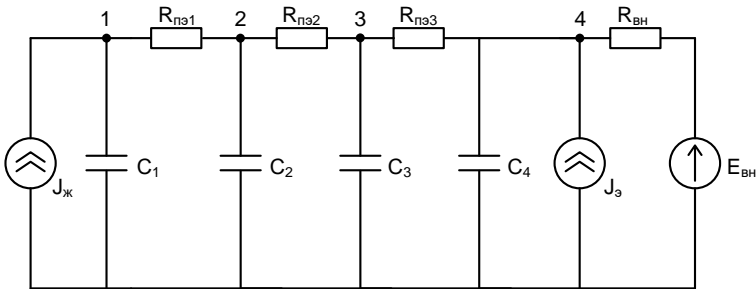


Рис. 4. Электрическая схема замещения тепловой модели КЛ

Расчет переходных процессов в рассматриваемой схеме удобно проводить в программном комплексе MATLAB+SIMULINK. При ступенчатом включении кабеля под нагрузку с помощью этой модели были получены графики изменения температуры характерных точек сечения КЛ во времени (рис. 5).

Динамическая модель теплового режима работы КЛ позволяет проанализировать и спрогнозировать ее работу в переходных режимах. Особенно это актуально для аварийных и послеаварийных режимов работы, которые характеризуются переходными процессами более высокой частоты по сравнению с частотой опроса температуры КЛ совре-

менными оптическими системами температурного мониторинга (порядка одного измерения температуры вдоль всей длины кабеля в течение нескольких минут).

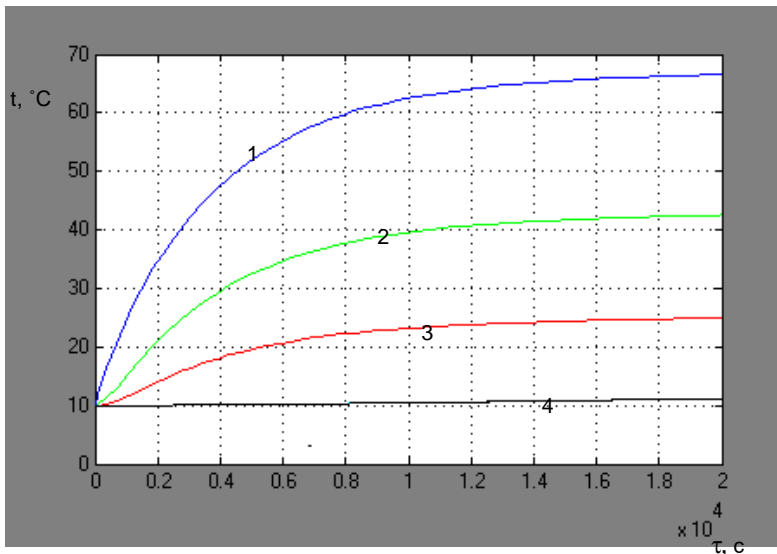


Рис. 5. Графики изменения температуры рассматриваемых точек в сечении кабеля

Алгоритм расчета изменения температуры в сечении КЛ. Для того, чтобы динамическая модель прогнозирования изменения температуры могла быть использована системой мониторинга в качестве программного модуля был разработан алгоритм, представляющий собой последовательность математических операций в виде простейшей циклической программы, которая рассчитывает переходные процессы в описанной выше схеме замещения. Для обеспечения быстроты расчета в основу данного алгоритма вошел метод численного интегрирования (метод трапеций). С помощью этого метода можно составить эквивалентную схему электрической цепи, содержащую только действующие в цепи источники, резистивные элементы и зависимые источники, заменяющие индуктивные и емкостные элементы.

Рассмотрим замену емкостного элемента (рис. 6, а):

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt},$$

откуда следует, что в момент времени t_k напряжение

$$u_C(t_k) = u_C(t_{k-1}) + \frac{1}{C} \int_{(k-1)h}^{kh} i_C(t) dt$$

или с применением среднего значения интеграла

$$u_{C,k} = u_{C,k-1} + \frac{h}{2C} (i_{C,k-1} + i_{C,k}).$$

Обозначив

$$\frac{h}{2C} = R_C; \quad E_{C,k-1} = u_{C,k-1} + R_C i_{C,k-1},$$

получим

$$R_k(x_j) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_{nk} \eta_n(x_j) \exp(i\phi_k)}{\lambda_n^2 - \omega_k^2 + 2i\varepsilon_n} \quad (2)$$

Этому соотношению между напряжением и током емкостного элемента для k-го шага соответствует эквивалентная схема или дискретная модель (рис. 5, б). При постоянном шаге h сопротивление R_L не изменяется от шага к шагу; ток источника зависит от значений тока и напряжения элемента на предыдущем шаге. Источник ЭДС иногда удобнее представить эквивалентным источником тока по формуле:

$$k = 0, 1, \dots, K \quad (3)$$

Соотношению (3) соответствует эквивалентная схема (дискретная модель) на рис. 6, в.

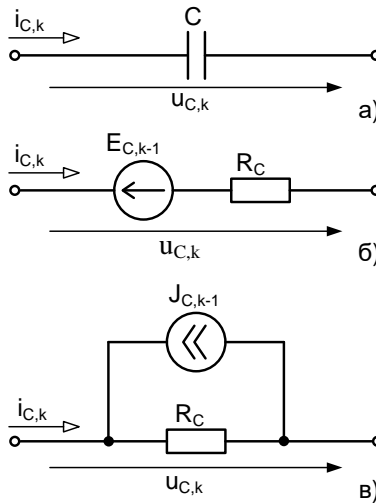


Рис. 6. Дискретная модель емкости

Заменяя емкости в исходной схеме их дискретными моделями с источниками тока и напряжения, где это удобно, получим схему, изображенную на рис. 7.

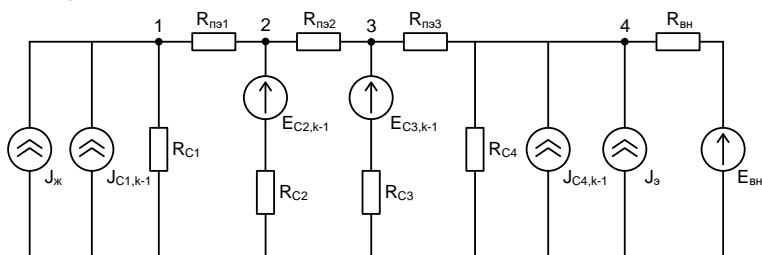


Рис. 7. Дискретная модель схемы замещения

В результате этой замены схему можно рассчитывать с помощью линейных уравнений на одном шаге интегрирования, а сама схема представляет собой дискретную модель электрической цепи. Алгоритм расчета изменения потенциалов указанных точек во времени изображен в виде блок-схемы на рис. 8.

С помощью этого алгоритма был произведен расчет изменения температуры рассматриваемого кабеля при подключении его к постоянной нагрузке. Величину этой нагрузки приняли равной предельно допустимой для кабеля с медной жилой и медным экраном при прокладке в земле по каталогу: $I_{\text{доп}} = 1368$ А. Ток в экране приняли равным 40% от

тока в жиле. При этом сама функция тока $H_k(x_j) = \sum_{n=1}^N \frac{F_n \eta_n(x_j)}{\lambda_n^2 - \omega_k^2 + 2i\epsilon_n}$ мо-

жет быть любой, в зависимости от конкретного потребителя. Температура окружающей среды была принята равной 10°C . Результаты расчета приведены на рис. 9.



Рис. 8. Блок-схема алгоритма расчета потенциалов

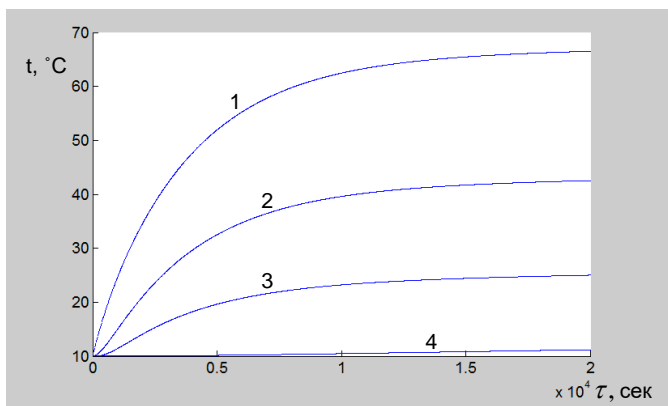


Рис. 9. Графики изменения температуры в 4 точках сечения кабеля

По графику изменения температуры видно, что ее значение вблизи жилы (кривая 1) не превышает предельно допустимого значения для материала изоляции (90 °C).

Результаты расчетов с помощью алгоритма полностью совпадают с результатами расчета модели в программе Simulink, таким образом, разработанный алгоритм может стать частью программного обеспечения системы температурного мониторинга высоковольтных кабельных линий с экструдированной изоляцией и позволит более точно определять температуру в любой точке сечения кабеля.

Список литературы

1. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: Изд-во «НИВА», 2008. – 104 с.
2. **Кузнецов Д.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А.** К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Электро. – 2009. – № 3. – С. 30–33.
3. **Гольдштейн В.Г., Лысенкова И.С., Уколова Т.В., Шпиц Л.В.** О проблемах эксплуатации кабелей 6-110 кВ из полимерной изоляции // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. В 3 т. Т.3. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – С. 364–366.
4. **Титков В.В.** К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // «Кабель-news». – 2009. – №10 (октябрь). – С. 47–51.
5. **Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов.** – И.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Разработка математической модели несимметричных и аварийных динамических режимов турбогенераторов

Одним из важных направлений в теории электрических машин является учет несимметричных переходных процессов, которые возникают как при нарушении симметрии питающих напряжений, так и при изменении параметров машины, например, при обрыве или коротком замыкании обмоток. Несмотря на обычную ограниченность во времени переходные процессы оказывают сильное влияние на работу машины и питающей электрической сети. Заранее выполненный расчет аварийного переходного процесса необходим для наладки автоматической защиты. Анализ несимметричных переходных процессов в электрических машинах затруднен нелинейностью магнитной цепи и учетом взаимного перемещения обмоток статора и ротора, расположенных в пазах зубчатых сердечников. Несмотря на появление в последние годы эффективных численных методов расчета динамических процессов электромеханических устройств [1] и внедрение в инженерную практику расчетов быстродействующей вычислительной техники анализ несимметричных переходных режимов электрических машин, как правило, проводится с использованием метода наложения принужденного и свободного режимов. При этом расчет принужденного режима производится методом симметричных составляющих, а учет свободных составляющих достигается введением различных коэффициентов, выявленных на основе сопоставления накопленных экспериментальных и расчетных данных. Очевидно, что такой подход базируется на довольно грубых допущениях и неадекватен возможностям современной вычислительной техники.

В настоящее время при анализе нелинейных динамических схем широко применяется метод переменных состояния [2], который совместим со многими методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений и может считаться универсальным методом. В данной работе на основе этого метода предлагается математическая модель нелинейных динамических процессов индуктивной электрической машины, учитывающая как несимметрию питающей сети, так и несимметрию параметров машины. Поскольку переходные процессы происходят при переходе от одного установившегося режима к другому, очевидно, что такая модель может быть применена и для исследования стационарных несимметричных процессов и получения статических характеристик электрических машин.

Как известно [2], в методе переменных состояния инвариантную относительно времени расчетную схему представляют двумя уравнениями:

$$\dot{[x]} = [A_p][x] + [B_p][e]; \quad (1)$$

$$[y] = [C_p][x] + [D_p][e] + \left([D_{1p}][\dot{e}] + \dots \right), \quad (2)$$

где $[e]$ – матрица-столбец независимых источников ЭДС; $[y]$ – матрица-столбец искомых напряжений и (или) токов ветвей; $[x]$ – матрица-столбец, содержащая независимые вспомогательные переменные; $[A_p]$, $[B_p]$, $[C_p]$, $[D_p]$, $[D_{1p}]$ – матрицы соответствующего размера, элементы которых определяются параметрами пассивных элементов расчетной схемы.

В случае линейных расчетных схем, содержащих в качестве пассивных элементов резисторы, идеальные катушки с взаимными индуктивностями и конденсаторы (RLCM-схемы), элементы матриц $[A_p]$, $[B_p]$, $[C_p]$, $[D_p]$, $[D_{1p}]$ являются постоянными и определяются параметрами пассивных линейных элементов. В нелинейных схемах элементы этих матриц являются переменными и их необходимо определять на каждом шаге численного интегрирования (1).

Как показано в [2], формирование матриц $[A_p]$, $[B_p]$, $[C_p]$, $[D_p]$, $[D_{1p}]$ целесообразно производить, используя топологию схемы. Дерево графа расчетной схемы замещения электрической цепи выбирается таким образом, чтобы оно удовлетворяло следующим условиям:

- включены все идеальные источники ЭДС (источники напряжения);
- включено максимально возможное количество конденсаторов (если они есть);
- включено минимально возможное количество катушек индуктивностей.

В зависимости от вида расчетной схемы часть индуктивных катушек может войти в дерево графа, а часть будет относиться к связям. Обозначим индексом «I» все, что относится к дереву графа, а индексом «S» все, что относится к дополняющему подграфу (связям). С учетом принятой нумерации ветвей матрицы-столбцы напряжений и токов всех ветвей (элементов) расчетной электрической схемы замещения можно представить соответственно из семи векторов:

$$[u] = [u_{EI} \ u_{CI} \ u_{RI} \ u_{LI} \ u_{LS} \ u_{RS} \ u_{CS}]^T;$$

$$[i] = [i_{EI} \ i_{CI} \ i_{RI} \ i_{LI} \ i_{LS} \ i_{RS} \ i_{CS}]^T, \quad (3)$$

где индексы E, C, R, L относятся соответственно к идеальным источникам ЭДС (источникам напряжения), конденсаторам, резисторам и идеальным индуктивным катушкам, при этом векторы напряжений и токов ветвей с индексом «I» соответствуют ветвям дерева графа, а векторы

напряжений и токов ветвей с индексом «S» – связям графа расчетной схемы.

Уравнения для главных сечений и главных контуров электрической расчетной схемы запишутся следующим образом [2]:

$$\begin{aligned}
 [D][i] &= \begin{bmatrix} 1_{E1} & 0 & 0 & 0 & Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ 0 & 1_{C1} & 0 & 0 & Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ 0 & 0 & 1_{R1} & 0 & Q_{31} & Q_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1_{L1} & Q_{41} & 0 & 0 \end{bmatrix} [i] = 0, \\
 [B][u] &= \begin{bmatrix} -Q_{11}^T & -Q_{21}^T & -Q_{31}^T & -Q_{41}^T & 1_{LS} & 0 & 0 \\ -Q_{12}^T & -Q_{22}^T & -Q_{32}^T & 0 & 0 & 1_{RS} & 0 \\ -Q_{13}^T & -Q_{23}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 1_{CS} \end{bmatrix} [u] = 0, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где 1_{E1} означает единичную матрицу порядка, равного числу идеальных источников ЭДС в дереве, такой же порядок имеют и другие единичные матрицы; элементы подматриц Q равны 1, -1 или 0, в зависимости от графа схемы.

Ветви, содержащие линейные резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы, описываются следующими соотношениями:

для резисторов

$$\begin{aligned}
 [u_{R1}] &= [R_1][i_{R1}] \quad \text{или} \quad [i_{R1}] = [G_1][u_{R1}]; \\
 [i_{RS}] &= [G_S][u_{RS}] \quad \text{или} \quad [u_{RS}] = [R_S][i_{RS}]; \quad (5)
 \end{aligned}$$

для конденсаторов

$$\begin{bmatrix} i_{C1} \\ i_{CS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_S \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{CS} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

для индуктивных катушек (с учетом взаимоиндуктивных связей)

$$\begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{LS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{1S} \\ L_{S1} & L_{SS} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{LS} \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{LS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{1S} \\ \Gamma_{S1} & \Gamma_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{LS} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Если в качестве переменных состояния $[x]$ (1) принять

$$[x] = \begin{bmatrix} u_{C1} \\ i_{LS} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

то с учетом соотношений (4)–(7) получение матриц $[A_p]$, $[B_p]$, $[C_p]$, $[D_p]$, $[D_{1p}]$ не представляет труда по известным алгоритмам [2].

При наличии электрической машины расчетная электрическая схема замещения будет содержать нелинейные элементы. Как показано в [2], возможность получения нормальной формы уравнений движения для нелинейных цепей зависит от вида характеристик нелинейных

элементов. При монотонной зависимости потокоцеплений ветвей машины $[\Psi_B]$ от токов $[i_B]$ уравнения переменных состояния в нормальной форме можно получить всегда [2], при этом в качестве этих переменных могут быть взяты как потокоцепления, так и токи ветвей. В [1] показано, что при известных напряжениях, приложенных к обмоткам машины, уравнения переменных состояния легко составляются относительно потокоцеплений ветвей, а токи ветвей могут быть определены через расчет аналоговой схемы замещения магнитной цепи машины.

В общем случае расчетная электрическая схема может содержать кроме электрической машины целый ряд как линейных, так и нелинейных элементов. Рассмотрим в качестве примера схему замещения электрической цепи асинхронной машины с фазным ротором (рис. 1), питание которой осуществляется от шин с известными линейными напряжениями $u_{AB} = e_{AB}$ и $u_{BC} = e_{BC}$ по магистрали с параметрами $R_{MA}, L_{MA}, R_{MB}, L_{MB}$ и R_{MC}, L_{MC} каждой линии. Параллельно входным зажимам машины подключена статическая батарея конденсаторов, соединенная по схеме треугольник, с параметрами C_A, C_B и C_C . К контактным кольцам ротора подключена в общем случае несимметричная нагрузка с параметрами R_{HA}, R_{HB} и R_{HC} каждой фазы. Через $R_{CA}, R_{CB}, R_{CC}, R_{PA}, R_{PB}, R_{PC}$ обозначены активные сопротивления несимметричных ветвей обмоток статора и ротора; через $\Psi_{CA}, \Psi_{CB}, \Psi_{CC}, \Psi_{PA}, \Psi_{PB}, \Psi_{PC}$ обозначены потокоцепления ветвей статора и ротора, обусловленные результирующим магнитным полем машины.

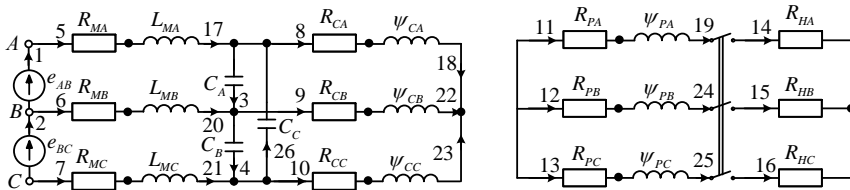


Рис. 1. Расчетная схема замещения электрической цепи машины

На рис. 1 произведена нумерация ветвей в соответствии с (3). При этом ветви 1–19 относятся к дереву графа, а ветви 20–26 – к связям графа. Для линейных катушек индуктивностей справедливо уравнение (7), а для ветвей, содержащих конденсаторы, – уравнение (6). Если напряжения ветвей машины, обусловленные ЭДС само- и взаимоиנדукции $[u_E]$ (ветви 18, 19, 22–25), можно было бы выразить через производные токов ветвей:

$$[u_E] = [L_B] \frac{d[i_B]}{dt}, \quad (9)$$

то формирование уравнений переменных состояния в данном случае ничем не отличалось бы от формальных алгоритмов для линейных RLCM-схем. Рассмотрим, как это можно сделать на основе анализа магнитной цепи электрической машины.

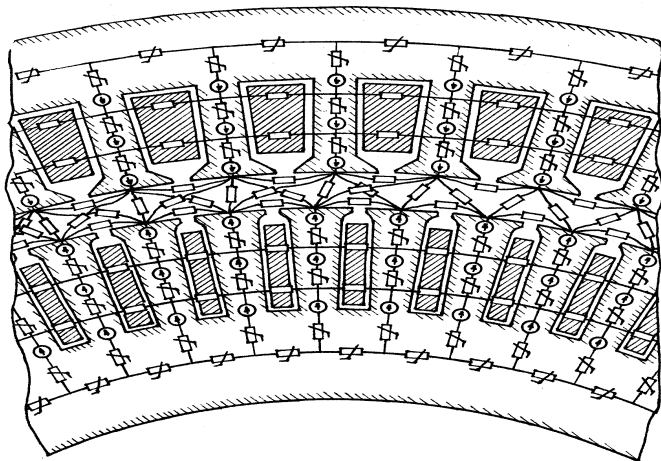


Рис. 2. Фрагмент схемы замещения магнитной цепи электрической машины с зубчатыми магнитопроводами

Магнитная цепь активной зоны машины при любых токах и напряжениях ее ветвей может быть представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами, которая будет содержать нелинейные и линейные проводимости и источники МДС [1]. На рис. 2 в качестве примера изображен фрагмент схемы замещения насыщенной электрической машины с зубчатыми магнитопроводами. Элементы зубцовой зоны и ярма представлены нелинейными проводимостями. Поля пазового рассеяния моделируются трубками магнитного потока в каждом пазу статора и ротора. Проводники с токами, ограниченные трубками потока пазового рассеяния, заменяются магнитными оболочками. На рис. 2 эти магнитные оболочки сформированы таким образом, что они пересекают зубцовые зоны сердечников. Поэтому ветви зубцов содержат источники МДС. Проводимости взаимной индукции между зубцами статора и ротора рассчитываются при различных взаимных положениях сердечников аналитическими или численными методами. По результатам расчета строятся кривые зависимостей этих проводимостей от угла поворота ротора $\Lambda(\alpha)$ с учетом скоса пазов. Полученные кривые аппроксимируются тем или иным способом, например, кубическими

сплайнами. Поэтому при любом взаимном положении сердечников статора и ротора линейные проводимости схемы замещения магнитной цепи можно считать известными.

Как показано в [1], вебер-амперные характеристики каждого нелинейного элемента магнитной цепи $\Phi_k(U_{mk})$ можно рассчитать заранее методами теории поля. Представим каждую k-ю ветвь схемы замещения магнитной цепи машины в виде обобщенной ветви, образованной последовательным соединением нелинейного элемента и источника МДС. При кусочно-линейной аппроксимации зависимости $\Phi_k(U_{mk})$ справедливо соотношение

$$\Phi_k = \Lambda_k U_{mk} + J_k, \quad (10)$$

где Λ_k – дифференциальная проводимость k-й ветви; J_k – управляемый напряжением U_{mk} источник магнитного потока.

Так как напряжение $U_{mk} = U_k + F_k$, то уравнение (10) можно записать в матричной форме следующим образом:

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][F] + [J], \quad (11)$$

где $[\Phi]$ – матрица-столбец магнитных потоков всех ветвей; $[U_m]$ – матрица-столбец падений магнитного напряжения на элементах ветвей; $[U]$ – матрица-столбец магнитных напряжений на обобщенных ветвях; $[F]$ – матрица-столбец источников МДС всех ветвей; $[\Lambda]$ – диагональная матрица дифференциальных проводимостей ветвей; $[J]$ – матрица-столбец управляемых напряжением источников магнитного потока.

Элементы матриц $[\Lambda]$ и $[J]$, соответствующие k-й нелинейной магнитной ветви, определяются номером отрезка σ_k аппроксимированной характеристики $\Phi_k(U_{mk})$. Для всех m нелинейных ветвей схемы замещения будут иметь комбинацию отрезков [2]. Обозначим через σ одну из таких комбинаций:

$$\sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k, \dots, \sigma_m\}, \quad (12)$$

т.е. σ – такой набор отрезков, когда σ_k ($k = 1, \dots, m$) берется для k-й нелинейной ветви.

Если комбинация отрезков σ известна, то можно считать известными все элементы матриц $[\Lambda]$ и $[J]$.

Как показано в [1], величины МДС ветвей схемы замещения магнитной цепи $[F]$ могут быть выражены через значения токов ветвей машины $[i_B]$ с помощью сингулярной матрицы преобразования $[C]$:

$$[F] = [C][i_B]. \quad (13)$$

Матрица $[C]$ имеет число столбцов, равное числу ветвей электрической цепи и число строк, равное числу ветвей схемы замещения магнитной цепи. Элементом этой матрицы, расположенном в k -й строке и j -м столбце, является число w_k , равное количеству витков с током j -й ветви электрической цепи i_{Bj} , охватывающих k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи. При этом если число витков с током i_{Bj} создают в k -й ветви МДС, совпадающие с выбранным положительным направлением магнитного потока, то w_k берется со знаком «плюс». В противном случае число w_k берется со знаком «минус».

С учетом (13) уравнение (11) можно записать в виде

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][C][i_B] + [J]. \quad (14)$$

Потокоцепления ветвей машины определяются выражением [1]

$$[\Psi_B] = [C]^T [\Phi] + [L_L][i_B], \quad (15)$$

где элементами матрицы $[L_L]$ являются само- и взаимоиנדуктивности лобового рассеяния.

С учетом (11) и (14) выражение (15) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} [\Psi_B] &= [C]^T [\Lambda][U] + [C]^T [\Lambda][C][i_B] + [C]^T [J] + [L_L][i_B] = \\ &= [L_M][i_B] + [C]^T ([\Lambda][U] + [J]), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{где } [L_M] = [C]^T [\Lambda][C] + [L_L]. \quad (17)$$

Напряжения ветвей электрической машины в соответствии со вторым законом Кирхгофа определяются матричным выражением

$$[u_B] = \frac{d[\Psi_B]}{dt} + [R_B][i_B] = [u_E] + [R_B][i_B], \quad (18)$$

где $[R_B]$ – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей машины; $[u_E] = \frac{d[\Psi_B]}{dt}$ – напряжения ветвей, обусловленные ЭДС само- и взаимоиנדукции.

При кусочно-линейной аппроксимации вебер-амперных характеристик нелинейных элементов магнитной цепи элементы матриц $[\Lambda]$ и $[J]$ являются постоянными при малых изменениях токов ветвей $d[i_B]$, поэтому с учетом (16) и (17)

$$[u_E] = [L_M] \frac{d[i_B]}{dt} + [C]^t [\Lambda] \frac{d[U]}{dt}. \quad (19)$$

Выразим магнитные напряжения $[U]$ на обобщенных ветвях схемы замещения магнитной цепи машины через токи $[i_B]$ электрической цепи. Для этого составим уравнения по первому закону Кирхгофа для схемы замещения магнитной цепи:

$$[A][\Phi] = 0, \quad (20)$$

где $[A]$ – редуцированная матрица инцидентий [2, 3].

Ненулевые значения скалярных магнитных потенциалов узлов схемы замещения магнитной цепи машины сведем в матрицу-столбец $[\varphi]$.

Напряжения ветвей $[U]$ связаны с потенциалами узлов $[\varphi]$ соотношением [2, 3]

$$[U] = [A]^T [\varphi]. \quad (21)$$

Подставляя в (20) выражения (14) и (21), получим:

$$[A][\Lambda][A]^T [\varphi] + [A][\Lambda][C][i_B] + [A][J] = 0. \quad (22)$$

Выражение (22) представляет собой уравнение, полученное по методу узловых потенциалов для магнитной цепи электрической машины.

Введем обозначение

$$[\Lambda_U] = [A][\Lambda][A]^T. \quad (23)$$

С учетом (21) и (22) получим

$$[U] = -[A]^T [\Lambda_U]^{-1} [A][\Lambda][C][i_B] - [A]^T [J]; \quad (24)$$

$$\frac{d[U]}{dt} = -[A]^T [\Lambda_U]^{-1} [A][\Lambda][C] \frac{d[i_B]}{dt}. \quad (25)$$

Обозначим

$$[L_B] = [L_M] - [C]^T [\Lambda][A]^T [\Lambda_U]^{-1} [A][\Lambda][C]. \quad (26)$$

С учетом (26) выражение (19) для напряжений $[u_E]$ примет вид (9) и по своей структуре ничем не будет отличаться от уравнения связи между током и напряжением на идеальных линейных индуктивностях схемы замещения электрической цепи [3]. При этом элементы матрицы $[L_B]$ имеют размерность индуктивностей и зависят от комбинации отрезков вебер-амперных характеристик σ (12) нелинейных ветвей схемы замещения магнитной цепи машины. Если комбинация отрезков σ задана, то можно считать известными все элементы матриц $[\Lambda]$, $[J]$ и $[L_B]$. Естественно, что комбинация отрезков σ зависит от значений

магнитных потоков $[\Phi]$ и потенциалов $[\varphi]$ схемы замещения магнитной цепи машины (которые, в свою очередь, зависят от токов ветвей $[i_B]$) и до решения уравнения (22) является неизвестной.

Численное интегрирование дифференциальных уравнений (1) производится при известных начальных значениях переменных состояния $[x]$, в число которых входят токи ветвей машины, относящиеся к связям графа $[i_{BS}]$. Кроме того, на любом шаге численного интегрирования переменные состояния являются известными. Как показано в [2, 3], токи всех ветвей электрической цепи всегда могут быть определены через токи связей графа. Поэтому на каждом шаге интегрирования (1) будут известны токи ветвей электрической машины $[i_B]$ и по (13) МДС схемы замещения ее магнитной цепи. Тогда при известных линейных магнитных проводимостях схемы замещения магнитной цепи и вебер-амперных характеристиках нелинейных элементов потенциалы $[\varphi]$ и комбинации отрезков вебер-амперных характеристик σ легко определяются из решения нелинейного уравнения (22) кусочно-линейным методом Ньютона-Рафсона [2]. Таким образом, элементы матрицы машины $[L_B]$ на каждом шаге интегрирования (1) можно считать известными.

Возвращаясь к электрической цепи, приведенной на рис. 1, для получения уравнений связи между напряжениями и токами на нелинейных катушках индуктивности машины в виде (7), представим уравнение (9) в виде

$$\begin{bmatrix} u_{EI} \\ u_{ES} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{BII} & L_{BIS} \\ L_{BSI} & L_{BSS} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{BI} \\ i_{BS} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Для идеальных линейных индуктивностей схемы замещения уравнения связи между токами $[i_H]$ и напряжениями $[u_H]$ могут быть представлены следующим образом (с учетом возможных взаимоиндуктивных связей):

$$\begin{bmatrix} u_{HI} \\ u_{HS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{HII} & L_{HIS} \\ L_{HSI} & L_{HSS} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{HI} \\ i_{HS} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Уравнения (27) и (28) можно объединить в одно:

$$\begin{bmatrix} u_{BI} \\ u_{HI} \\ u_{BS} \\ u_{HS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{BII} & 0 & L_{BIS} & 0 \\ 0 & L_{HII} & 0 & L_{HIS} \\ L_{BSI} & 0 & L_{BSS} & 0 \\ 0 & L_{HSI} & 0 & L_{HSS} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{BI} \\ i_{HI} \\ i_{BS} \\ i_{HS} \end{bmatrix}$$

или

$$\begin{bmatrix} u_{LI} \\ u_{LS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{II} & L_{IS} \\ L_{SI} & L_{SS} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{LI} \\ i_{LS} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

где

$$\begin{aligned} [u_{LI}] &= \begin{bmatrix} u_{BI} \\ u_{HI} \end{bmatrix}; [u_{LS}] = \begin{bmatrix} u_{BS} \\ u_{HS} \end{bmatrix}; [i_{LI}] = \begin{bmatrix} i_{BI} \\ i_{HI} \end{bmatrix}; [i_{LS}] = \begin{bmatrix} i_{BS} \\ i_{HS} \end{bmatrix}; \\ [L_{II}] &= \begin{bmatrix} L_{BII} & 0 \\ 0 & L_{HII} \end{bmatrix}; [L_{IS}] = \begin{bmatrix} L_{BIS} & 0 \\ 0 & L_{HIS} \end{bmatrix}; \\ [L_{SI}] &= \begin{bmatrix} L_{BSI} & 0 \\ 0 & L_{HSI} \end{bmatrix}; [L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{BSS} & 0 \\ 0 & L_{HSS} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (30)$$

При учете перемещения ротора относительно статора в (1) войдут дополнительно два уравнения динамики:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_{\mathcal{E}} - M_M); \quad \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \quad (31)$$

где Ω – угловая частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции ротора с учетом приводных механизмов; $M_{\mathcal{E}}$ и M_M – соответственно электромагнитный и механический моменты, приложенные к валу ротора; α – угол поворота ротора относительно статора.

В этом случае к элементам матрицы-столбца переменных состояния $[x]$ добавятся еще две переменные: Ω и α , т.е.

$$[x] = [u_{CI} \quad i_{LS} \quad \Omega \quad \alpha]^T. \quad (32)$$

Решение дифференциальных уравнений производится при известных начальных условиях

$$[x(0)] = [u_{CI}(0) \quad i_{LS}(0) \quad \Omega(0) \quad \alpha(0)]^T,$$

которые могут быть приняты нулевыми при подключении машины к сети, при этом мгновенное значение электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$, входящее в уравнение (31), определяется на каждом шаге интегрирования после расчета магнитной цепи по формулам, приведенным в [1].

В качестве примера рассмотрим переходные процессы, возникающие при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Расчет таких переходных процессов представляет значительный интерес при определении бросков пусковых токов и моментов, а также

времени выхода на установившуюся частоту вращения, что особенно важно для электроприводов с большой частотой включения. В данной работе анализ переходных процессов асинхронных двигателей осуществляется как по разработанной модели, так и по модели идеализированной обобщенной машины [4], в основе которой лежат уравнения Парка-Горева и которая до настоящего времени широко применяется в расчетной практике. На рис. 3 приведены кривые изменения тока фазы статора при пуске асинхронного двигателя 4AA56B2У3 в режиме холостого хода (1 – эксперимент; 2 – расчет по рассматриваемой модели; 3 – расчет по уравнениям Парка-Горева). Анализ результатов расчета и эксперимента показывает, что в режиме холостого хода на начальном этапе пуска при отсутствии насыщения магнитной цепи обе модели практически адекватны. Из сопоставления пусковых характеристик этого двигателя (рис. 4), полученных по рассматриваемой модели (кривые 1) и по уравнениям Парка-Горева (кривые 2) в режиме нагрузки, следует, что при моменте сопротивления на валу, равном номинальному, имеются расхождения по этим моделям и на начальном этапе пуска.

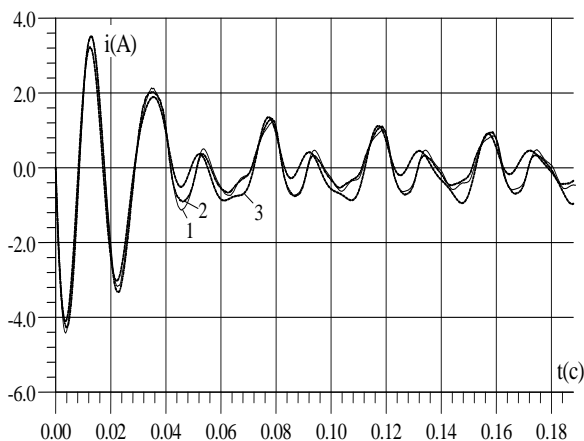


Рис. 3. Изменение тока статора при пуске асинхронного двигателя 4AA56B2У3

При этом погрешность расчета ударного момента по обобщенной модели составляет 11 %, максимальное расхождение электромагнитного момента в некоторые моменты переходного процесса превышает 20 %.

Одним из достоинств рассматриваемой математической модели динамических электромагнитных процессов электромеханических устройств является то, что она позволяет рассчитывать по одной и той же программе самые различные режимы работы электрических машин, в том числе и аварийные. На рис. 4, 6 приведены данные расчета электродвигателя 4AA56B2У3 нормального исполнения (кривые 1) и при

обрыве двух стержней короткозамкнутого ротора (кривые 2). Из полученных кривых видно, что нарастание электромагнитного момента при пуске электродвигателя с несимметричной обмоткой ротора имеет интервал запаздывания. Сопоставление начальных бросков момента и тока стержня, расположенного в соседнем пазу с оборванным, показывает их существенное увеличение по сравнению с нормальным режимом (на 34,5 % по моменту и на 132 % по току). При этом время разгона двигателя увеличивается. Все это указывает на повышенную нагрузку механических передач в динамике электропривода и на снижение надежности его работы при большой частоте включений.

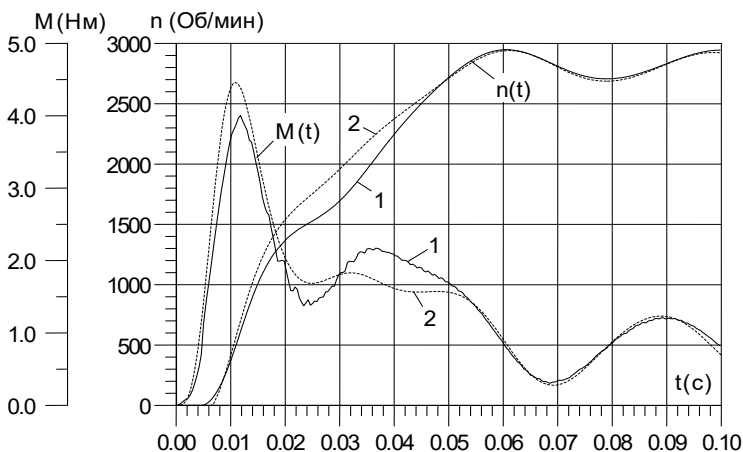


Рис. 4. Изменение частоты вращения и электромагнитного момента при пуске асинхронного двигателя 4AA56B2УЗ

Список литературы

1. Мартынов В.А. Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств. – Иваново, 2000. – 140 с.
2. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
3. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для студ., обучающихся по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1994. – 318 с.
5. Брынский А.Е., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
7. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

8. **Мартынов В.А., Сычев Е.К.** Математическое моделирование полей и процессов в синхронных двигателях с постоянными магнитами // Электричество. – 1994. – № 3. – С. 47–51.

И.С. Снитко, В.А. Мартынов

Математическая модель динамических электромагнитных процессов в измерительных трансформаторах

Одним из важных направлений в теории измерительных трансформаторов является учет динамических процессов, которые возникают при изменении параметров как сети, так и присоединенной нагрузки. Несмотря на обычную ограниченность во времени переходные процессы оказывают сильное влияние на работу измерительных трансформаторов. Заранее выполненный расчет аварийного переходного процесса необходим для наладки автоматической защиты. Анализ переходных процессов в измерительных трансформаторах затруднен нелинейностью магнитной цепи и учетом нагрузки, содержащей в общем случае как индуктивные, так и емкостные элементы. Несмотря на появление в последние годы эффективных численных методов расчета динамических процессов электромагнитных устройств и внедрение в инженерную практику расчетов быстродействующей вычислительной техники анализ переходных режимов, как правило, проводится с использованием метода наложения принужденного и свободного режимов. Очевидно, что такой подход базируется на довольно грубых допущениях и неадекватен возможностям современной вычислительной техники.

В настоящее время при анализе нелинейных динамических схем широко применяется метод переменных состояния [1], который совместим со многими методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений и может считаться универсальным методом.

При моделировании процессов в измерительном трансформаторе будем считать, что насыщение магнитной цепи обусловлено только магнитными потоками, замыкающимися по стальным участкам магнитопровода. А потоки рассеяния отдельных ветвей трансформатора, замыкающиеся по немагнитным участкам, могут быть учтены соответствующими линейными индуктивностями рассеяния, которые рассчитываются предварительно с помощью современных численных методов анализа магнитного поля. В качестве примера на рис. 1 приведена конструкция трансформатора [3]. Магнитная цепь трансформатора при любых токах и напряжениях его ветвей может быть представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами, которая будет содержать нелинейные и линейные проводимости и источники МДС [1]. На рис. 2 приведена схема замещения магнитной цепи трансформато-

ра. На рисунке не показаны цепи магнитных потоков рассеяния, так как они практически не влияют на распределение магнитных потоков в стальном сердечнике.

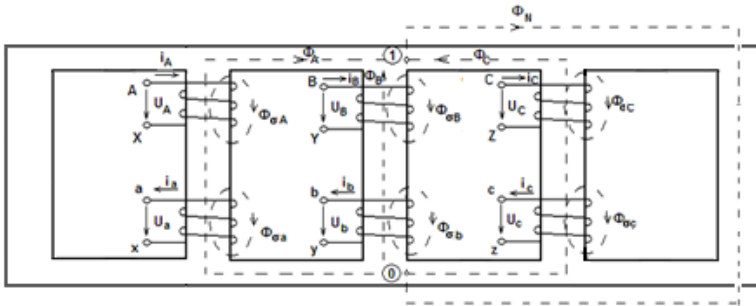


Рис. 1. Магнитная цепь трехфазного пятистержневого трансформатора

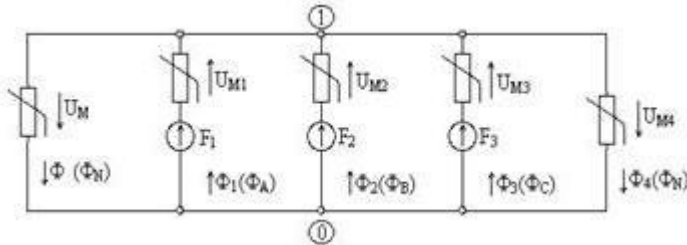


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи трехфазного пятистержневого трансформатора

Как показано в [1], вебер-амперные характеристики каждого нелинейного элемента магнитной цепи $\Phi_k(U_{Mk})$ (рис. 3,б) можно рассчитать заранее методами теории поля. Представим каждую k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи трансформатора в виде обобщенной ветви, образованной последовательным соединением нелинейного элемента и источника МДС (рис. 3, а). При кусочно-линейной аппроксимации зависимости $\Phi_k(U_{Mk})$ справедливо соотношение

$$\Phi_k = \Lambda_k U_{Mk} + J_k, \quad (1)$$

где Λ_k – дифференциальная проводимость k -й ветви; J_k – управляемый напряжением U_{Mk} источник магнитного потока.

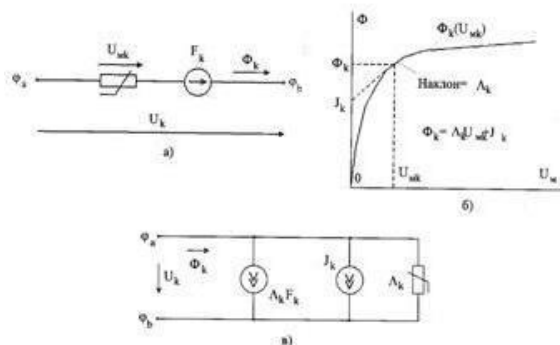


Рис. 3. Обобщенная ветвь схемы замещения магнитной цепи и вебер-амперная характеристика ее нелинейного элемента

Так как напряжение $U_{mk} = U_k + F_k$, то уравнение (1) можно записать в матричной форме следующим образом:

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][F] + [J], \quad (2)$$

где $[\Phi]$ – матрица-столбец магнитных потоков всех ветвей; $[U]$ – матрица-столбец магнитных напряжений на обобщенных ветвях; $[F]$ – матрица-столбец источников МДС всех ветвей; $[\Lambda]$ – диагональная матрица дифференциальных проводимостей ветвей; $[J]$ – матрица-столбец управляемых напряжением источников магнитного потока.

Как показано в [1], величины МДС ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора $[F]$ могут быть выражены через значения токов ветвей трансформатора $[i_T]$ с помощью сингулярной матрицы преобразования $[C]$:

$$[F] = [C][i_T]. \quad (3)$$

Матрица $[C]$ имеет число столбцов, равное числу ветвей электрической цепи, и число строк, равное числу ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора. Элементом этой матрицы, расположенным в k -й строке и j -м столбце, является число w_k , равное количеству витков с током j -й ветви электрической цепи i_{Tj} , охватывающих k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи. При этом если число витков с током i_{Tj} создают в k -й ветви МДС, совпадающие с выбранным положи-

тельным направлением магнитного потока, то w_k берется со знаком «плюс». В противном случае число w_k берется со знаком «минус».

С учетом (3) уравнение (2) можно записать в виде

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][C][i_T] + [J]. \quad (4)$$

Потокоцепления ветвей трансформатора определяются выражением

$$[\Psi_T] = [C]^T [\Phi] + [L_\sigma][i_T], \quad (5)$$

где элементами матрицы $[L_\sigma]$ являются само- и взаимоиндуктивности рассеяния ветвей трансформатора.

Элементы матрицы $[L_\sigma]$ целесообразно рассчитывать, используя современные численные методы расчета магнитных полей.

С учетом (2–4) выражение (5) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} [\Psi_T] &= [C]^T [\Lambda][U] + [C]^T [\Lambda][C][i_T] + [C]^T [J] + [L_\sigma][i_T] = \\ &= [L_i][i_T] + [C]^T ([\Lambda][U] + [J]), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } [L_i] = [C]^T [\Lambda][C] + [L_\sigma]. \quad (7)$$

Напряжения ветвей измерительного трансформатора

$$[u_{вт}] = \frac{d[\Psi_T]}{dt} + [R_T][i_T] = [u_T] + [R_T][i_T], \quad (8)$$

где $[R_T]$ – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей

трансформатора; $[u_T] = \frac{d[\Psi_T]}{dt}$ – напряжения ветвей, обусловленные

ЭДС само- и взаимоиндукции как главного поля, так и полей рассеяния.

При кусочно-линейной аппроксимации вебер-амперных характеристик нелинейных элементов магнитной цепи элементы матриц $[\Lambda]$ и

$[J]$ являются постоянными при малых изменениях токов ветвей $d[i_T]$, поэтому с учетом (6)

$$[u_T] = [L_i] \frac{d[i_T]}{dt} + [C]^t [\Lambda] \frac{d[U]}{dt}. \quad (9)$$

Уравнения по первому закону Кирхгофа для схемы замещения магнитной цепи трансформатора любого типа можно записать в виде

$$[A][\Phi] = 0, \quad (10)$$

где $[A]$ – редуцированная матрица инцидентий [2].

Нулевые значения скалярных магнитных потенциалов узлов схемы замещения трансформатора сведем в матрицу-столбец $[\varphi]$.

Напряжения ветвей $[U]$ связаны с потенциалами узлов $[\varphi]$ соотношением

$$[U] = [A]^T [\varphi]. \quad (11)$$

Подставляя в (10) выражения (4) и (11), получим:

$$[A][\Lambda][A]^T [\varphi] + [A][\Lambda][C][i_T] + [A][J] = 0. \quad (12)$$

Введем обозначение

$$[\Lambda_T] = [A][\Lambda][A]^T. \quad (13)$$

Размерность матрицы $[\Lambda_T]$ обычно невелика и зависит от выполнения магнитопровода трансформатора. Так, для трансформатора, изображенного на рис. 1, матрица $[\Lambda_T]$ представляет собой скаляр.

С учетом (13) магнитные потенциалы узлов $[\varphi]$ выразим через токи ветвей трансформатора $[i_T]$:

$$[\varphi] = -[\Lambda_T]^{-1} [A][\Lambda][C][i_m] - [\Lambda_T]^{-1} [A][J]. \quad (14)$$

Тогда с учетом (11)

$$\frac{d[U]}{dt} = -[A]^T [\Lambda_T]^{-1} [A][\Lambda][C] \frac{d[i_T]}{dt}. \quad (15)$$

Обозначим

$$[L_T] = [L_i] - [C]^T [\Lambda][A]^T [\Lambda_T]^{-1} [A][\Lambda][C]. \quad (16)$$

Тогда напряжения ветвей трансформатора, обусловленные ЭДС само- и взаимоиндукции $[u_T]$ (9), можно выразить через производные токов ветвей:

$$[u_T] = [L_T] \frac{d[i_T]}{dt}. \quad (17)$$

Выражение (17) по виду ничем не отличается от уравнения связи между током и напряжением на линейных индуктивностях схемы замещения электрической цепи. Уравнения переменных состояния относительно токов ветвей измерительного трансформатора $[i_T]$ с учетом (17) и (8) будут иметь следующий вид:

$$\frac{d[i_T]}{dt} = [L_T]^{-1} ([u_{вТ}] - [R_T][i_T]). \quad (18)$$

При известных начальных условиях (18) решается известными методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений на ЭВМ, при этом токи $[i_T]$ на каждом шаге интегрирования являются известными. Зная токи ветвей $[i_T]$, из решения магнитной

цепи [1], можно найти потоки $[\Phi]$ и рассчитать элементы матрицы $[L_T]^{-1}$. Первичные напряжения ветвей при расчете трансформатора обычно считаются известными, а вторичные напряжения, входящие в матрицу $[u_{BT}]$, могут быть определены на каждом шаге интегрирования по вольт-амперной характеристике дуги через вторичные токи, входящие в матрицу $[i_T]$.

Предложенная математическая модель электромагнитных процессов является универсальной и позволяет анализировать как статические, так и динамические процессы в измерительных трансформаторах самых различных конструкций.

Список литературы

1. **Мартынов В.А.** Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств. – Иваново, 2000. – 140 с.
2. **Чуа Л.О., Лин Пен-Мин.** Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
3. **Рожкова Л.Д., Козулин В.С.** Электрооборудование станций и подстанций: учеб. для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

И. Д. Ратманова

Решение задач оптимизации на основании единой информационной модели

В процессе проектирования развития электросетевых районов решается широкий круг оптимизационных задач, сложность которых состоит в том, что критерии этих задач противоречат друг другу, как, например, противоречат критерий экономичности и надежности. Однако число возможных планов развития сети конечно и при автоматизированном анализе каждого из них возможно решение, удовлетворяющее каждому из условий.

Множество вероятных решений R по определенному плану i можно представить по [1] как

$$R_i = \{r_{im}, m = 1, 2, \dots, M\}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где N – число принимаемых подходов к сооружению электроэнергетических объектов; M – число вариантов реализации подходов по плану.

На перспективные решения по строительству и реконструкции электроэнергетических объектов накладывается множество ограничений, технологических требований, которые могут быть выражены множеством NO :

$$NO_i = \{no_{ik}, k = 1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, N\}, \quad (2)$$

где K – число ограничений. В этом случае множество возможных для реализации решений VR можно представить как $VR = R/NO$.

Условием существования вероятно-оптимальных решений является наличие непустого множества VR_i возможных решений vr_{ij}

$$VR_i = \bigcap_{j=1}^J vr_{ij} = \emptyset, \quad VR_i = \{vr_{ij}, j = 1, 2, \dots, J\}, \quad (3)$$

где J – число возможных реализуемых решений.

Достаточным условием полного удовлетворения всем критериям является наличие непустого множества VR вероятно-оптимальных решений VR_i развития системы:

$$VR = \bigcap_{j=1}^J VR_i = \emptyset. \quad (4)$$

Окончательное решение может быть принято на основании перспективы развития сети.

Общий подход к поиску оптимальных вариантов развития сети можно свести к последовательному перебору множества допустимых вариантов развития сети, опираясь на один или несколько критериев, не противоречащих друг другу. Критерии, которые противоречат выбранным условиям, должны быть ранжированы по степени важности. Те, выполнения которых строго обязательно, будут введены в модель как ограничивающие условия, несоответствие которым относит рассматриваемое состояние или режим к неподходящим. Прочие условия могут учитываться в виде штрафных функций.

Единая информационная модель, построенная на основании объектного подхода, может служить основой для многокритериальной оптимизации. В основе построения единой информационной модели лежит объектный подход, представляющий каждый элемент в качестве объекта, обладающего рядом свойств-параметров.

Наследуя свойства модели для расчета режимов и токов короткого замыкания, единая информационная модель имеет следующие группы свойств: условно-графическое изображение, топологические, режимные и схемные параметры. Топологические параметры позволяют определять связь между двумя элементами сети, что может быть основой для анализа надежности. Режимные параметры – это результаты расчета установившегося режима или токов короткого замыкания. Эти параметры могут выступать как в качестве составляющих целевой функции, так и в качестве ограничивающих условий. Схемные параметры определяются по паспортным данным оборудования, взятым из базы данных справочника. Связь между каждым объектом модели и базой данных справочника значима для перебора возможных вариантов оборудования при решении задачи [2].

На основании объектной модели за счет расширения свойств каждого объекта могут быть построены новые модели без потери качества исходных.

Таким образом, в условиях единой информационной модели, когда доступны и режимные, и схемные параметры с учетом номенклатуры оборудования, возможен автоматизированный перебор вариантов сети, например, автоматизированный перебор используемого оборудования с детальной оценкой параметров режима. В этом случае построение оптимизационной модели сведется к выбору целевой функции и ограничивающих условий. Оптимизация будет проводиться на уровне реальных элементов сети, а в качестве результата может выступать не только необходимый состав оборудования и места его установки, но и сам режим с учетом этого оборудования.

В данной задаче применимы методы упорядоченного перебора (метод ветвей и границ) или поисковые методы, такие как метод покоординатного спуска или деформируемого многогранника [3].

Простейшей задачей, решаемой такой моделью, является выбор оптимальных точек размещения компенсирующих устройств. В качестве варьируемых параметров могут выступать возможные точки размещения компенсирующих устройств, а также число и мощность этих устройств. В качестве целевой функции – минимум дисконтированных затрат, в качестве ограничений – предельно допустимые значения токов и напряжений, что требует расчета и анализа установившегося режима.

Выбор целевой функции зависит от цели, которую преследует проектировщик. В качестве целевой функции могут выступать как схемные (оптимальное сопротивление), так и режимные параметры (минимум тока короткого замыкания, минимум потерь мощности).

Особый интерес для оптимизации при планировании развития сети в качестве целевой функции представляют технико-экономические показатели. Однако для их использования необходимо дополнить имеющуюся модель необходимой информацией для их определения. Совокупность исходных данных и расчетных блоков, нацеленных на получение технико-экономических показателей, составляют затратную модель.

Основой формирования затратной модели является расчет следующих показателей:

- суммарные капиталовложения $K_{\text{и}}$;
- дисконтированные затраты, вычисленные по [4], как

$$Z = \sum_{t=1}^T (K_{\text{и}} + I_{\text{и}})(1 + E)^{1-t} \quad (5)$$

где $I_{\text{и}}$ – издержки за год; $K_{\text{и}}$ – суммарные капиталовложения; E – норма дисконта; t – текущий год; T – период строительства и эксплуатации;

- чистый дисконтированный доход:

$$ЧДД = \sum_{t=1}^T \frac{D_{ti} + D_{thi} - I_{ti} - K_{ti} - Y_t}{(1+E)^t} \quad (6)$$

где D_{ti} – суммарный доход в год t , включающий плату за электроэнергию, получаемую от потребителей; D_{thi} – плата потребителя электроснабжающей организации за имеющуюся степень надежности; Y_t – ущерб от перерывов электроснабжения.

Суммарные капиталовложения можно найти как сумму капиталовложений по элементам сети. Для оценки постоянной части капитальных затрат необходимо ввести понятия «электростанция» и «подстанция», применительно к участкам модели сети, а численные значения могут определяться на основе анализа состава и структуры оборудования, входящего в подстанцию. Эксплуатационные издержки на текущий ремонт и обслуживание определяются с использованием нормы отчислений, определенной для каждого класса оборудования. Эксплуатационные издержки, связанные с покрытием технических потерь электроэнергии, определяются по результатам расчета установившегося режима максимальных нагрузок и по оценочному значению времени максимальных потерь, которое может рассматриваться либо как нормативная величина для соответствующего района, либо вычисляться по совокупным графикам электропотребления.

Неотъемлемой частью затратной модели может считаться расчет ущерба от перерыва электроснабжения, включенный в чистый дисконтированный доход. Данные для определения ущерба, такие как параметр потока отказов ω_B , частота ремонта ω_P , время восстановления при аварийном T_B и при плановом ремонте T_P могут быть рассмотрены как дополнительный набор свойств, необходимый для создания затратной модели.

Структура формирования этих параметров показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура затратной модели

Стоит отметить, что технико-экономических показатели значимы не только как сложная целевая функция для решения оптимизационных задач. Их автоматизированный подсчет должен облегчить работу проектировщика.

В рамках решения задач оптимизации расчет технико-экономических затрат напрямую способен качественно изменить процесс проектирования. Так, принятие некоторых решений становится возможным без косвенных величин, например таких, как экономическая плотность тока.

Список литературы

1. Дмитриев С.А., Кокин С.Е., Мошинский О.Б., Хальясмаа А.И. Оценка технико-экономического состояния системы электроснабжения мегаполисов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. всерос. науч.-техн. конф.: сб. ст. В 2 т. – Екатеринбург: УРФУ, 2010. – Т.2. – 330 с.

2. Ильичев Н.Б., Ильичева Е.Н. Информационная модель электроэнергетической сети при проектировании развития с использованием программного комплекса EnergyCS // Автоматизация проектирования систем электроснабжения и автоматики на базе решений группы компаний CSoft. Сб. ст. / ЗАО СиСофт-Иваново, ЗАО СиСофт. – Москва, 2011. – 253 с

3. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ / пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

4. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.

В. Д. Лебедев

Расчет тепловых потерь в одножильном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена

Кабели с СПЭ-изоляцией 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

Своими уникальными свойствами СПЭ кабели обязаны применяемому изоляционному материалу. Способ вулканизации, применяемый при его изготовлении, позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции и обеспечить отсутствие воздушных включений. Помимо хороших диэлектрических свойств, изоляция из сшитого полиэтилена обладает большим, чем у других материалов, диапазоном рабочих температур и отличными механическими характеристиками.

Основными конструктивными особенностями данного типа кабелей являются его однофазное исполнение и наличие экрана.

Однако, отечественный опыт эксплуатации выявил один существенный недостаток – перегрев участков кабеля, приводящий к его частичному или полному выгоранию.

Для выявления причины данного явления необходимо подробно рассмотреть электромагнитные и тепловые процессы, протекающие в кабеле.

Рассмотрим модель кабеля и определим тепловые потери. Модель кабеля представлена на рис. 1.

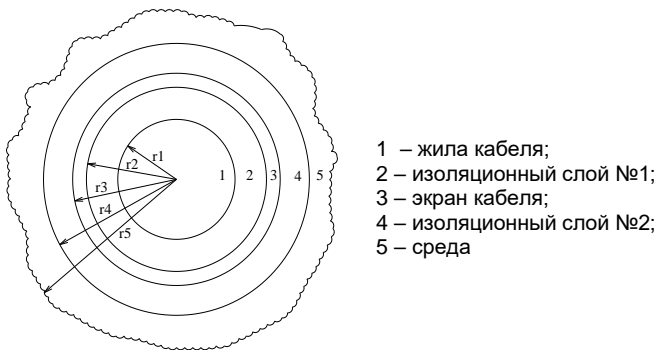


Рис. 1. Расчетная модель кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

Для расчета воспользуемся следующими формулами:

Область 1: $0 \leq r \leq r_1$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_1}{dr} \right) = - \frac{P_{01}}{K_1},$$

$$r \frac{dU_1}{dr} = - \frac{P_{01} r^2}{2K_1} + c_1,$$

$$\frac{dU_1}{dr} = - \frac{P_{01} r}{2K_1} + \frac{c_1}{r},$$

$$U_1(r) = - \frac{P_{01} r^2}{4K_1} + c_1 \ln r + c_2.$$

Область 2: $r_1 \leq r \leq r_2$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_2}{dr} \right) = 0,$$

$$r \frac{dU_2}{dr} = c_3,$$

$$\frac{dU_2}{dr} = \frac{c_3}{r},$$

$$U_2(r) = c_3 \cdot \ln r + c_4.$$

Область 3: $r_2 \leq r \leq r_3$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_3}{dr} \right) = -\frac{P_{03}}{K_3},$$

$$r \frac{dU_3}{dr} = -\frac{P_{03}r^2}{2K_3} + c_5,$$

$$\frac{dU_3}{dr} = -\frac{P_{03}r}{2K_3} + \frac{c_5}{r},$$

$$U_3(r) = -\frac{P_{03}r^2}{4K_3} + c_5 \cdot \ln r + c_6.$$

Область 4: $r_3 \leq r \leq r_4$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_4}{dr} \right) = 0,$$

$$r \frac{dU_4}{dr} = c_7,$$

$$\frac{dU_4}{dr} = \frac{c_7}{r},$$

$$U_4(r) = c_7 \cdot \ln r + c_8.$$

Область 5: $r_4 \leq r \leq r_5$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_5}{dr} \right) = 0,$$

$$r \frac{dU_5}{dr} = c_9,$$

$$\frac{dU_5}{dr} = \frac{c_9}{r},$$

$$U_5(r) = c_9 \cdot \ln r + c_{10}.$$

Подставив в приведенные уравнения исходные данные и технические параметры кабелей, получим тепловые потери при постоянном токе.

Для расчета потерь на переменном токе необходимо произвести уточненный расчет, учитывая влияние способа заземления экранов кабелей, а так же поверхностный эффект.

Список литературы

1. **Кабельные** системы с изоляцией из сшитого полиэтилена. Руководство пользователя. АBB.

2. **Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.** Однофазные кабели 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет заземления экранов // Новости электротехники. – №5 (47).

И.Е. Иванов, В. А. Шуин

Моделирование воздушных линий электропередачи в целях совершенствования функционирования микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики этих линий

Правильное функционирование устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС) как в нормальных режимах, так и в условиях электромагнитных переходных процессов, вызванных короткими замыканиями (КЗ) и коммутациями в ЭЭС, имеет очень существенное значение. В связи с этим возникают следующие актуальные задачи:

1) точное определение параметров защищаемого электроэнергетического объекта (ЭЭО) для обеспечения корректного расчета параметров, задаваемых в УРЗА (главным образом, параметров срабатывания защит);

2) адекватное моделирование комплексной системы «ЭЭО – УРЗА» с целью исследования поведения УРЗА с рассчитанными параметрами срабатывания в различных режимах ЭЭО и ЭЭС в целом.

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) значительной протяжённости (т.н. «длинные» ВЛЭП) являются особым объектом среди всех ЭЭО с точки зрения моделирования электромагнитных переходных процессов (ЭМПП). Это обусловлено следующим:

1) распределенность параметров ВЛЭП;

2) зависимость продольных параметров (активное и индуктивное сопротивление) от частоты.

Верхняя граница частотного спектра переходных процессов в соответствии с данными, представленными в [1], может достигать 3 кГц при коротких замыканиях (КЗ) и 20 кГц при коммутационных перенапряжениях. Пренебрежение частотной зависимостью продольных па-

раметров ВЛЭП может привести к более «грубым» результатам расчетов. В этой связи актуальным представляется использование моделей, учитывающих данную зависимость, особенно при моделировании ЭМПП, приводящих к появлению существенных по величине составляющих нулевой последовательности (например, при замыкании фазы на землю). Следует, тем не менее, отметить, что на практике применение этих моделей возможно не всегда (об этом речь пойдет ниже).

Библиотека Simulink/SimPowerSystems программного комплекса MATLAB, широко используемая при моделировании процессов в ЭЭС, содержит модели ВЛЭП с сосредоточенными и распределенными параметрами. Параметры обеих моделей задаются посредством ввода матриц $[R]$, $[L]$ и $[C]$, которые могут быть определены из геометрических характеристик ВЛЭП (обычно для частоты 50 Гц) непосредственно в Simulink. При расчете переходного процесса эти параметры предполагаются постоянными. Основным преимуществом специализированного программного комплекса ATP-EMTP при моделировании ВЛЭП является возможность учета зависимости параметров от частоты.

Графический препроцессор ATPDraw, широко применяемый во всем мире для моделирования процессов в ЭЭС с использованием вычислительного ядра ATP-EMTP, содержит значительно большее количество моделей линий по сравнению с Simulink/SimPowerSystems. Их можно разделить на три большие группы:

- 1) модели с сосредоточенными параметрами (PI-circuits);
- 2) модели с распределенными постоянными (т.е. не зависящими от частоты) параметрами;
- 3) модели с частотно-зависимыми параметрами (Semlyen, JMarti, Noda).

Модели линий с сосредоточенными параметрами в общем случае можно описать схемой, представленной на рис. 1. Эти модели, по сравнению с другими, являются относительно простыми и хорошо описывают линию на определенной частоте, а именно – на той частоте, на которой вычисляются матрицы входящих в модель параметров. Основное преимущество этих моделей заключается в том, что в установившемся режиме они обеспечивают точное решение.

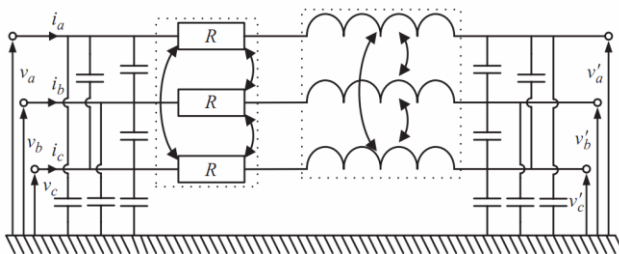


Рис. 1. Модель линии с сосредоточенными параметрами и наличием взаимной индукции

Модели с распределенными постоянными параметрами основаны на методе Бержерона (в специальной литературе часто называется методом характеристик), на котором также основана модель Distributed Parameter Line в Simulink/SimPowerSystems. Недостатки модели, обусловленные неучетом частотной зависимости матриц $[R]$ и $[L]$, особенно сильно проявляются при наличии в токе или напряжении составляющих нулевой последовательности. Кроме того, время моделирования процессов в относительно коротких линиях может оказаться слишком большим, поскольку шаг по времени должен быть меньше, чем время распространения волны.

В препроцессоре ATPDraw имеются как модели транспонированных линий с распределенными параметрами (Clarke), так и нетранспонированных линий (KCLee). Следует отметить, что ATPDraw позволяет «вручную» расставить все необходимые транспозиции, для чего предназначен специальный элемент (в Simulink/SimPowerSystems подобная опция отсутствует).

Поскольку ВЛЭП имеют частотно-зависимые параметры, решение при моделировании ЭМПП, как правило, должно искажаться в частотной области. Основы нескольких разработанных для этого алгоритмов изложены, например, в [1, 2]. Модели Semlyen и JMarti, имеющиеся в ATP-EMTP, отличаются друг от друга алгоритмами аппроксимации частотной зависимости параметров линии, а в модели Noda используется несколько иной подход: вычисления производятся непосредственно в фазных величинах, а не в т.н. модальных.

Каждая из указанных трех моделей имеет свои преимущества и недостатки, и вопрос об использовании той или иной из них, как правило, должен решаться отдельно для каждой конкретной задачи. В препроцессор ATPDraw встроено очень мощное средство верификации моделей, что является его несомненным достоинством. Степень адекватности выбранной модели ВЛЭП можно проверить еще до проведения непосредственного эксперимента. Это обеспечивается сравнением модели в широком диапазоне частот с точным решением, т.е. с точным PI-эквивалентом, рассчитанным на множестве частот. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты частотного сканирования в логарифмическом масштабе частот для одной из линий. Очевидно, что модель JMarti, учитывающая частотную зависимость, обеспечивает более корректные результаты по сравнению с моделью с постоянными распределенными параметрами.

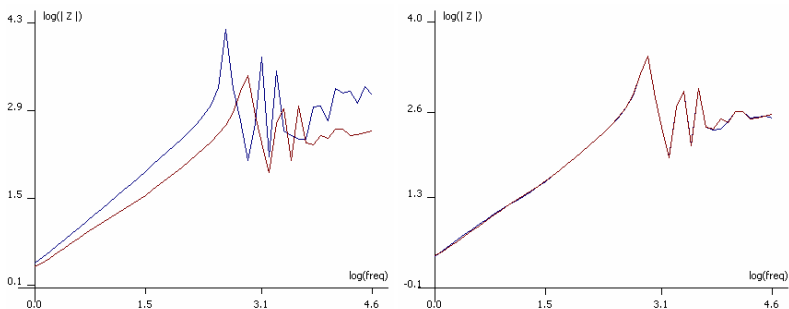


Рис. 2. Результаты верификации (частотного сканирования) моделей ВЛЭП в ATPDraw: слева – модель с постоянными распределенными параметрами; справа – модель JMarti

Следует отметить, что в Simulink/SimPowerSystems модели с частотно-зависимыми параметрами отсутствуют. Тем не менее, MATLAB обладает неоспоримыми преимуществами именно как математический пакет и рассматривается авторами, прежде всего, как незаменимый инструмент обработки осциллограмм, полученных с помощью комплекса ATP–EMTP.

Как отмечалось выше, использование частотно-зависимых моделей возможно не всегда. Это обусловлено необходимостью задания точных геометрических параметров ВЛЭП. На практике, однако, подобные сведения могут отсутствовать, и единственной информацией о ВЛЭП могут являться уже рассчитанные для определенной заданной частоты матрицы ее параметров. В связи с этим можно предложить обобщенный алгоритм выбора модели ВЛЭП, отраженный на рис. 3.

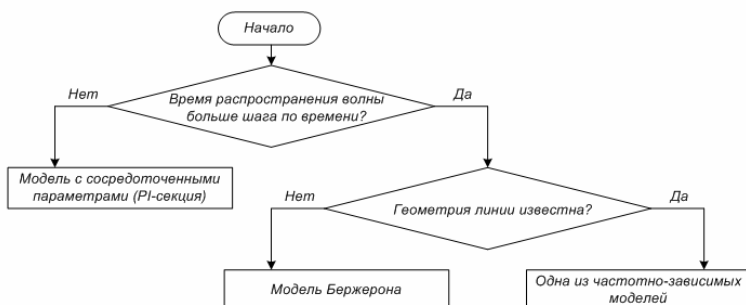


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм выбора модели воздушной линии электропередачи

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1) для исследования ЭМПП во ВЛЭП в интересах УРЗА в общем случае необходимо учитывать частотную зависимость продольных параметров ВЛЭП;

2) оптимальным инструментом моделирования из имеющихся на сегодняшний день представляется использование комплекса АТР–ЕМТР, в частности, препроцессора АТРDraw;

3) вопрос о выборе модели ВЛЭП для конкретной задачи необходимо решать на основании алгоритма, приведенного на рис. 3. Если выбрана одна из частотно-зависимых моделей, необходимо оценить степень ее адекватности посредством инструмента частотного сканирования в интересующем диапазоне частот.

Дальнейшим направлением исследований представляется анализ и сопоставление известных методик определения матриц параметров ВЛЭП с целью более точного учета различных факторов (в частности, электрических и магнитных свойств грунта), оказывающих влияние на значения этих параметров. Кроме того, перспективной представляется создание актуализированной модели ВЛЭП, позволяющей принять во внимание динамические изменения параметров одной и той же ВЛЭП в течение года, и разработка соответствующего алгоритма для микропроцессорных УРЗА ВЛЭП. Возможности этих УРЗА в настоящее время позволяют реализовать сложные алгоритмы обработки поступающих данных, однако принципы их функционирования относительно задания и использования параметров срабатывания в общем и целом до сих пор остаются теми же, как и для устройств на электромеханической элементной базе. В этой связи создание адаптивной модели ВЛЭП является ключевой задачей, решение которой позволило бы существенно улучшить эффективность функционирования микропроцессорных УРЗА.

Список литературы

1. **Juan A. Martinez-Velasco.** Power system transients: parameter determination / Juan A. Martinez-Velasco (Eds.). – CRC Press, 2010.
2. **Neville Watson and Jos Arrillaga.** Power systems electromagnetic transients simulation. – United Kingdom, The Institution of Engineering and Technology, 2007.
3. **Dommel H.W.** Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Bonneville Power Administration, Portland, 1986.

Повышение эффективности функционирования городских электрических сетей посредством регулируемой компенсации реактивной мощности

В настоящее время вопросам повышения эффективности функционирования городских электрических сетей уделяется большое внимание, это объясняется постоянно растущим потреблением электроэнергии.

В настоящее время в г. Москве происходит неуклонный ежегодный рост электропотребления в бытовом секторе, доля социально-бытового сектора в общей структуре энергетической нагрузки города составляет 70 %, потребление реактивной мощности также увеличивается за счет новых систем освещения, импульсных блоков питания компьютерной техники, частотных преобразователей электроприводов, использующих для работы нелинейные элементы, электродвигателей стиральных машин и кондиционеров и многого другого.

Среди многочисленных факторов, оказывающих влияние на эффективность работы электрических сетей, одно из приоритетных мест занимает компенсация реактивной мощности (КРМ). Многие считают, что из-за относительно коротких фидеров и небольшой присоединенной мощности многочисленных потребителей проблемы компенсации реактивной мощности для городских низковольтных распределительных сетей не существует [1]. Однако, инструментальные исследования, проведенные в системах электроснабжения жилых многоквартирных домов различной этажности микрорайона Южное Тушино г. Москвы, показали, что значения коэффициентов мощности на вводах домов находятся в пределах 0,75–0,98. Замеры проводились прибором AR 5, один из полученных графиков представлен на рис. 1.

Интенсивный рост потребления электроэнергии в жилищном секторе, высокая плотность городской коммунально-бытовой нагрузки, наличие в перетоках мощности реактивной составляющей приводит к значительным потерям электроэнергии и ограничению возможности присоединения к сетям новых потребителей.

Классическим решением данной проблемы в распределительных сетях является компенсация реактивной мощности у потребителя путем установки у него дополнительных источников реактивной мощности. Сложность решения данного вопроса во многом связана с неравномерным потреблением реактивной мощности по отдельным фазам, затрудняющая применение традиционных для промышленных сетей установок компенсации реактивной мощности на базе трехфазных батарей конденсаторов, управляемых регулятором, установленным в одной из фаз компенсируемой сети.

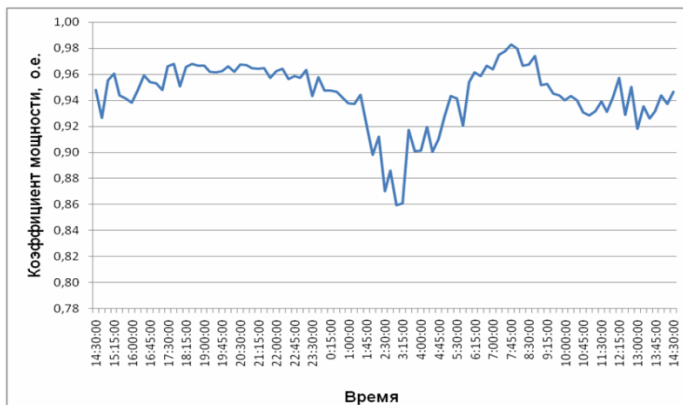


Рис. 1. График изменения коэффициента мощности на вводе в жилой дом по адресу: ул. Подочная, д. 27

Устройства компенсации реактивной мощности с пофазной компенсацией, предназначенные для независимой пофазной компенсации в трехфазных сетях, применяются для высокоточной компенсации реактивной мощности в сетях с несимметричной нагрузкой, укомплектованы однофазными конденсаторными батареями и специализированными управляющими контроллерами, силовыми тиристорными интеллектуальными модулями [2].

На сегодняшний день на рынке УКРМ представлены устройства с пофазной компенсацией реактивной мощности производств Испании (CIRCUTOR), Германии (BELUK), Чехии (BMR), Австрии (BENEDIKT), России (Русэлм) и др.

Список литературы

1. Шишкин С.А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии // Энергосбережение. – 2004. – № 4.
2. Jungwirth P. Power factor correction on site // Epcos components. – 2005. – №4.

Разработка численной модели развития разряда в газах низкого давления в плоскопараллельной электродной системе

Экспериментальное исследование разрядов в газах затруднено, поскольку сопряжено с высокими затратами на создание оборудования, проведение эксперимента и разработку измерительного аппарата. Построение численной модели разряда в газах, в которой отслеживалось бы движение каждой частички газа и ее взаимодействие с другими участниками процесса является наиболее доступным способом изучения процессов в газах. Однако при разработке подобной модели на вычислительной технике возникает проблема ограниченного объема памяти и быстродействия современных компьютеров, поскольку даже при низких давлениях газа порядка 10 Па в 1 м³ может содержаться около 10¹⁸ частиц. Преодолеть эти трудности возможно, используя для моделирования метод крупных частиц. В методе крупных частиц рассматриваются ансамбли частиц, обладающие одинаковыми или близкими свойствами, и анализируются взаимодействия не отдельных частиц, а взаимодействия этих ансамблей. Использование метода крупных частиц позволяет значительно сократить требуемый для программы объем оперативной памяти и реализовать вычислительный эксперимент за вполне приемлемый промежуток времени.

Для моделирования процессов формирования разряда в газах в плоскопараллельной электродной системе была разработана программа PLAZMA, основанная на методе крупных частиц. Для плоскопараллельного поля ансамбли крупных частиц представляются в виде «облаков» – плоскостей с частицами.

В программе моделируются следующие виды взаимодействий «облаков»: ударная ионизация атомов электронами, рекомбинация положительных ионов и электронов и неупругие взаимодействия электронов с ионами и нейтральными частицами. Результат взаимодействия «облаков» рассчитывается на основе вероятностного статистического аппарата в зависимости от энергии взаимодействия.

Блок-схема программы PLAZMA приведена на рис. 1.

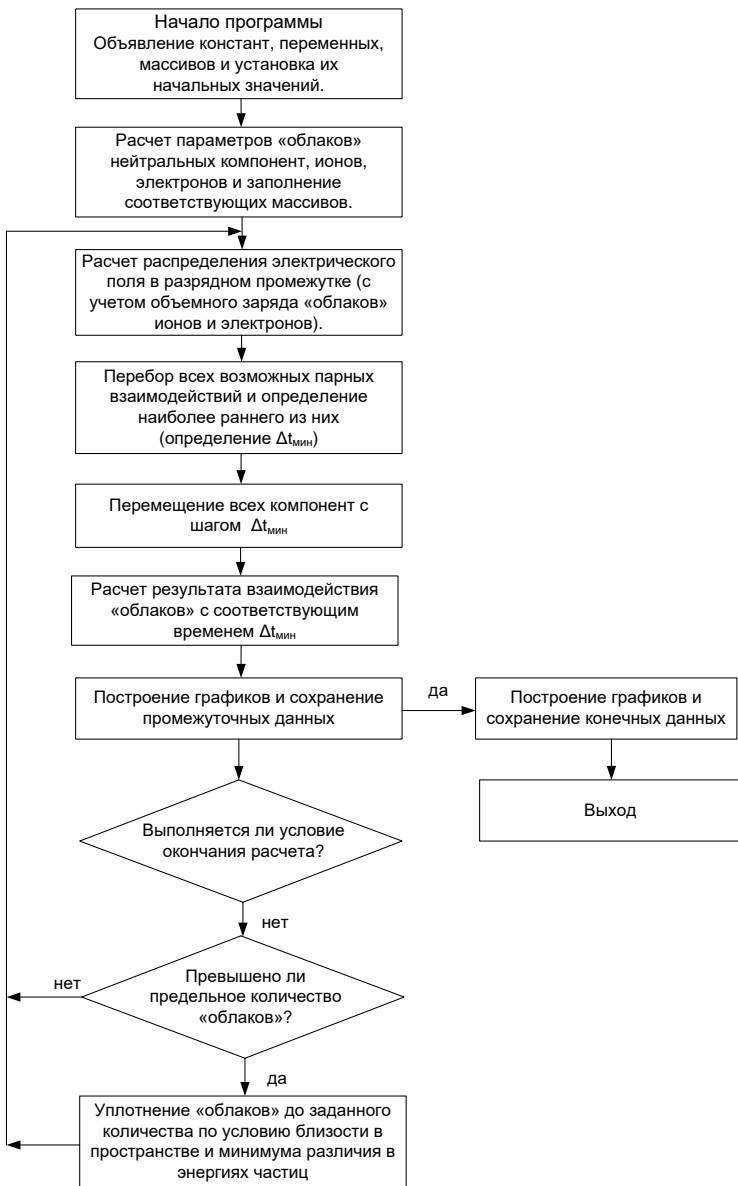


Рис. 1. Блок-схема программы PLASMA

В программе принято, что при взаимодействии «облака» электронов с анодом происходит его полная компенсация («облако» уничтожается). Для расширения возможностей модели блок программы, отвечающий за взаимодействие, реализуется как динамически подключаемая библиотека. Поэтому пользователи могут сами добавлять математические описания тех взаимодействий, которые необходимо учесть в конкретной задаче.

В процессе работы программы вся информация о параметрах «облаков» (координата, скорость, тип составляющих частиц и их количество в «облаке») хранится в оперативной памяти компьютера в динамических массивах. Обращение во время вычисления только к ячейкам оперативной памяти позволяет минимизировать время проведения компьютерного эксперимента. Поэтому весь программный комплекс разделен на две независимые части.

В первой части производится заполнение начальных данных: состав газа, его температура и давление, расстояние между электродами, а также количество «облаков» (см. рис. 2). Программа позволяет моделировать газоразрядные процессы не только в однокомпонентных газах, но и газовых смесях, в состав которых могут входить до 12 компонент. Подготовленные данные сохраняются на жестком диске компьютера в файл формата `dat`; работа первой части программного комплекса на этом завершается.

Вторая часть программы PLAZMA начитается с загрузки данных из файла, сохраненного ранее. В начале работы модели все «облака» случайным образом распределяются вдоль промежутка. Плотность частиц на «облаке», его скорость и направление движения выбираются из условия сохранения принятого закона Максвелла о распределении частиц по энергиям при заданных давлении и температуре газа.

Реализуется циклический расчет, состоящий из перемещения всех «облаков» за один бесстолкновительный интервал времени от одного взаимодействия до другого и обработка результата этого взаимодействия. Программа анализирует треугольную матрицу взаимодействий крупных частиц и ищет ближайшее по времени взаимодействие из всей их совокупности. Поскольку найденное взаимодействие имеет минимальное время реализации (Δt_{\min}), то возможно переместить все «облака» частиц в пространстве на это время Δt_{\min} , считая, что процесс перемещения бесстолкновительный. Для незаряженных «облаков» частиц (нейтральные атомы и молекулы) это движение принимается равномерным, а для заряженных частиц – равноускоренным, с учетом действующих на них кулоновских сил в электрическом поле. Та же пара «облаков», которая имела минимальное время взаимодействия, после перемещения вступает во взаимодействие. После анализа типа взаимодействующих компонентов, их количества на «облаках» и энергии взаимодействия, программа инициализирует создание новых «облаков» с параметрами доли компонентов, которые в соответствии с вероятностной моделью вступили во взаимодействие.

Ввод исходных данных

Начальные данные

10	- давление газа, Па.
20	- начальная температура газа, С ⁰ .
0,1	- расстояние между электродами, м.
3	- количество контролируемых компонентов (3...NMG=12).
100000	- суммарное количество "облаков" (не более NOM=52297991).

Назад Отмена Далее

Рис. 2. Ввод исходных данных, характеризующих макроскопические параметры моделируемой газовой среды

Таким образом, в процессе счета увеличиваются количество «облаков» частиц и время счета одного цикла. Если не предпринять каких-либо специальных мер, то через некоторое количество шагов программа остановится из-за переполнения оперативной памяти компьютера. Для оптимизации расчета во время вычислений отслеживается случай, когда вычисления требуют всю оперативную память машины, и в этот момент производится «уплотнение облаков». Подпрограмма «уплотнения облаков» осуществляет нахождение близко расположенных однотипных «облаков» с близкими значениями векторов скоростей и объединяет эти «облака» в одно. При таком объединении «облаков» частиц происходит их «взвешивание», в результате которого новое, объединенное, «облако» не приведет к искажению исходного распределения электрического поля вдоль разрядного промежутка и не нарушит баланса распределения энергий по компонентам газовой смеси.

При расчете электрического поля возникла проблема восстановления распределения поля, так как при замене реального распределения зарядов в разрядном промежутке сосредоточенными зарядами на «облаках» частиц распределение электрического поля искажается. Восстановление истинного распределения поля выполняется методом кусочно-линейной аппроксимации. При аппроксимации придерживались следующих критериев:

1. Интеграл от функции распределения объемного заряда вдоль разрядного промежутка равен нулю.

2. Интеграл от напряженности поля равен разности потенциалов между электродами.

3. Отдельно рассматривались распределения от положительных и отрицательных зарядов. Это позволяет получить более точные результаты восстановления, поскольку функции выделенных распределений являются монотонными.

Для оценки достоверности полученных результатов был проведен эксперимент на опытной установке. Схема установки представлена на рис. 3.

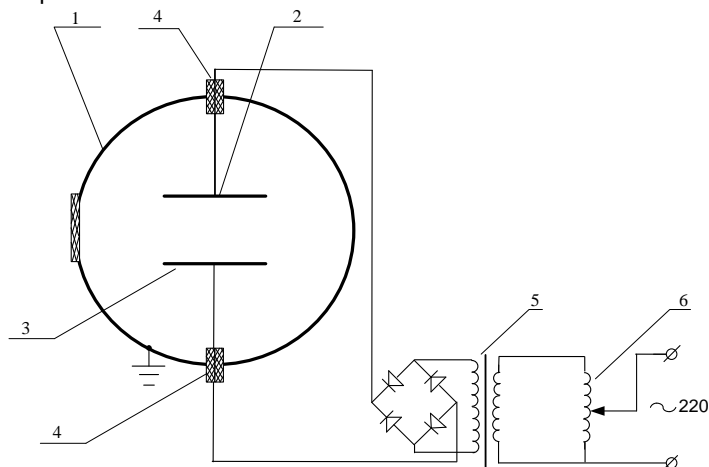


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – заземленная металлическая вакуумная камера; 2 – верхний электрод; 3 – нижний электрод; 4 – высоковольтные вакуумные проходные изоляторы; 5 – высоковольтный импульсный трансформатор; 6 – лабораторный автотрансформатор

Ставилась задача, в которой оценивалось изменение концентрации заряженных частиц азота от напряжения при развитии разряда в плоскопараллельной электродной системе с расстоянием между ними 3 см, при давлении 20 Па, температуре 25 °С, при постоянном напряжении, которое изменялось от 100 до 200 В, общее число частиц $n = 5,303 \cdot 10^{21}$.

Исследование газового разряда проводилось с применением Ленгмюровского зондового метода. Электрическая схема зонда представлена на рис. 4.

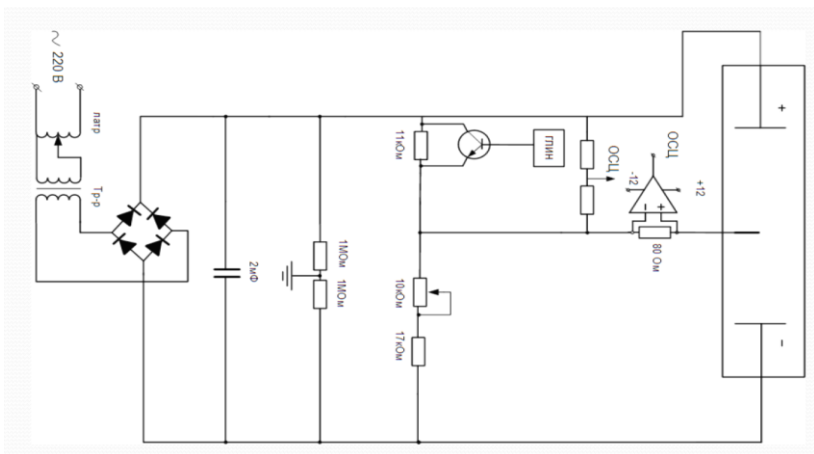


Рис. 4. Электрическая схема зондового измерения характеристик газового разряда

Экспериментальным путем получены концентрации заряженных частиц в газовом разряде, в зависимости от приложенного к межэлектродному промежутку напряжения (рис. 5).

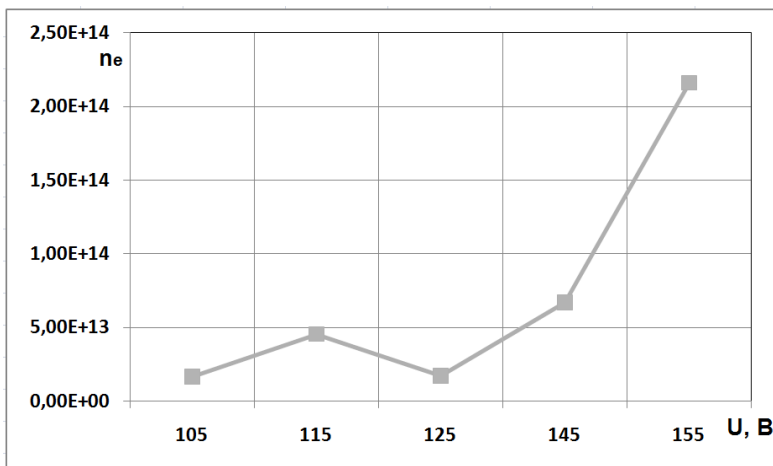


Рис. 5. Зависимость концентрации заряженных частиц газа от напряжения на электродах в азоте при давлении 20 Па

Разница в концентрациях заряженных частиц газа в программе PLAZMA и в эксперименте составила 9 %. Небольшой процент расхож-

дения подтверждает правильность выбора математической модели и реализованного в программе алгоритма.

Перспективой для развития программы PLAZMA является создание возможности отслеживания параметров состояния газового разряда, таких как температура, ток, а также изменение в широких пределах формы напряжения воздействующего на электроды. Кроме того, предполагается использовать модель в процессе изучения курса «Физика газового разряда».

Список литературы

1. **Хокни Р., Иствуд Дж.** Численное моделирование методом частиц; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
2. **Воробьёв В.Ф., Беляев Г.В., Крайков А.Н.** Моделирование процессов формирования электрического разряда в газах методом крупных частиц // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 80–82.

А.А. Скоробогатов

Разработка метода измерения скольжения по гармоникам внешнего магнитного поля

Асинхронный электродвигатель является единой взаимосвязанной электромеханической системой. Изменения в механической части двигателя вызывают изменения в электрической части и наоборот. Появление различных неисправностей неизбежно приводит к изменениям магнитного поля в воздушном зазоре, что выражается либо в изменении амплитуд существующих спектральных составляющих, либо в появлении новых гармоник в спектре поля. Наиболее современные и перспективные методы контроля и диагностики асинхронных двигателей основаны на выявлении этих изменений путем спектрального анализа вибрации, тока статора или магнитных полей машины.

Частотные составляющие спектра, связанные с теми или иными повреждениями, по большей части известны. Эти гармоники зависят от ряда постоянных и переменных составляющих. К постоянным составляющим относятся паспортные данные двигателя или отдельных его узлов, например, подшипников. Значения этих параметров обычно известны. К переменным составляющим относятся, по большому счету, всего два параметра – это частота сети и скольжение, точные значения которых обычно заранее не известны. Поэтому для практической реализации методов спектрального анализа необходимо определение точных значений частоты сети и скольжения. Определение частоты сети является простой задачей. Она равна частоте гармоники с максимальной амплитудой. В настоящее время широкое распространение получили оптические тахометры. Это недорогие и удобные в эксплуатации устройства, позволяющие измерять частоту вращения бесконтактным

образом. Однако для реализации методов спектрального анализа гораздо удобнее и практичнее определять значение скольжения непосредственно из спектра.

Из [1, 2] известен ряд источников гармоник, несущих информацию о скольжении. В качестве основных источников можно выделить зубчато-пазовую структуру ротора, эксцентриситет воздушного зазора, несимметрию токов в обмотке ротора и т.д.

Для реализации способа определения скольжения были выбраны гармоники, вызванные зубчатостью ротора. По сравнению с другими источниками, зубцовые гармоники ротора (ЗГР) имеют ряд преимуществ.

1. Зубцовые гармоники всегда присутствуют в магнитном поле воздушного зазора.

2. Зубцовые гармоники являются одними из наиболее мощных, что обеспечивает относительную простоту их определения.

Зубцовые гармоники ротора можно определить по следующему выражению:

$$f_{\text{ЗГР}}^{(k\pm)} = \frac{Z_p}{p} f_c (1-s) \pm k f_c, \quad (1)$$

где f_c – частота сети; s – скольжение; p – число пар полюсов; Z_p – число стержней обмотки ротора.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан стенд. Объектом исследований является трехфазный асинхронный электродвигатель ЗВР71-2 с номинальной мощностью $P_{\text{НОМ}} = 250$ Вт, параметры которого приведены в табл. 1. В целях создания ступенчатого регулирования нагрузки на валу ротора к двигателю подсоединен генератор постоянного тока, к которому подключены 3 лампы накаливания. В качестве источника диагностического сигнала было решено использовать внешнее магнитное поле двигателя. Для измерения внешнего магнитного поля двигателя используется электромагнитный датчик, который представляет из себя П-образный разомкнутый магнитопровод с обмоткой. Такая конструкция датчика была выбрана из соображений повышения чувствительности и защиты от внешних магнитных полей. Для измерения текущего скольжения электродвигателя использован оптический тахометр (см. табл. 2). Сигнал с датчика поступает в компьютер через специальную плату ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов с возможностью их цифровой обработки в реальном времени. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемого двигателя ЗВР71-2

Мощность, Вт	Номинальная частота вращения, об/мин	Число пар полюсов	Число стержней
250	2880	1	19

В качестве метода исследования был выбран спектральный анализ ЭДС, наводимой в датчике внешнего магнитного поля. Обработка и анализ данных осуществлялись в программном пакете MATLAB.

Были проведены измерения магнитного поля в воздушном зазоре и магнитного поля за пределами корпуса электродвигателя в продолжительном нормальном режиме работы. Все измерения проводились при следующих нагрузках на валу ротора: XX, $0,5P_{НОМ}$, $P_{НОМ}$, $1,5P_{НОМ}$.

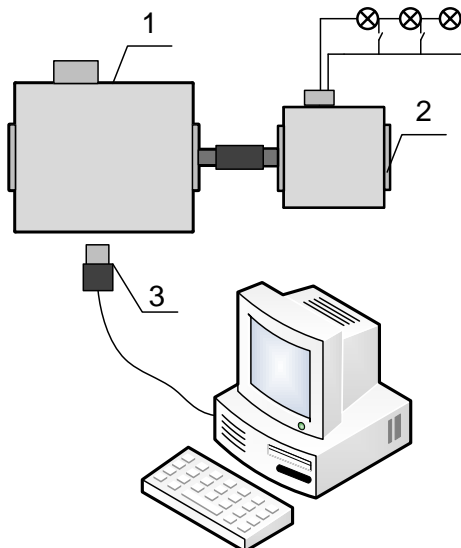


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – асинхронный двигатель; 2 – генератор постоянного тока с подключенными к нему лампами накаливания; 3 – датчик внешнего магнитного поля

Таблица 2. Значения частот зубцовых гармоник, рассчитанные по данным, полученным с оптического тахометра

Нагрузка	Частота вращения, об/мин	Скольжение	Частоты ЗГР, Гц	
XX	2983	0,00572	894,614	994,619
$0,5P_{НОМ}$	2938	0,021	880,364	980,369
$1P_{НОМ}$	2897	0,034	867,381	967,386
$1,5P_{НОМ}$	2848	0,051	851,864	951,869

На рис. 2 показаны зубцовые гармоники ротора в спектре внешнего магнитного поля двигателя при различной нагрузке на валу ротора. Как можно заметить значения частот зубцовых гармоник, полученные расчетным путем, в точности соответствуют значениям частот, полученных из экспериментальных данных. Этот факт позволяет сделать вывод, что данные гармоники пригодны для определения скольжения.

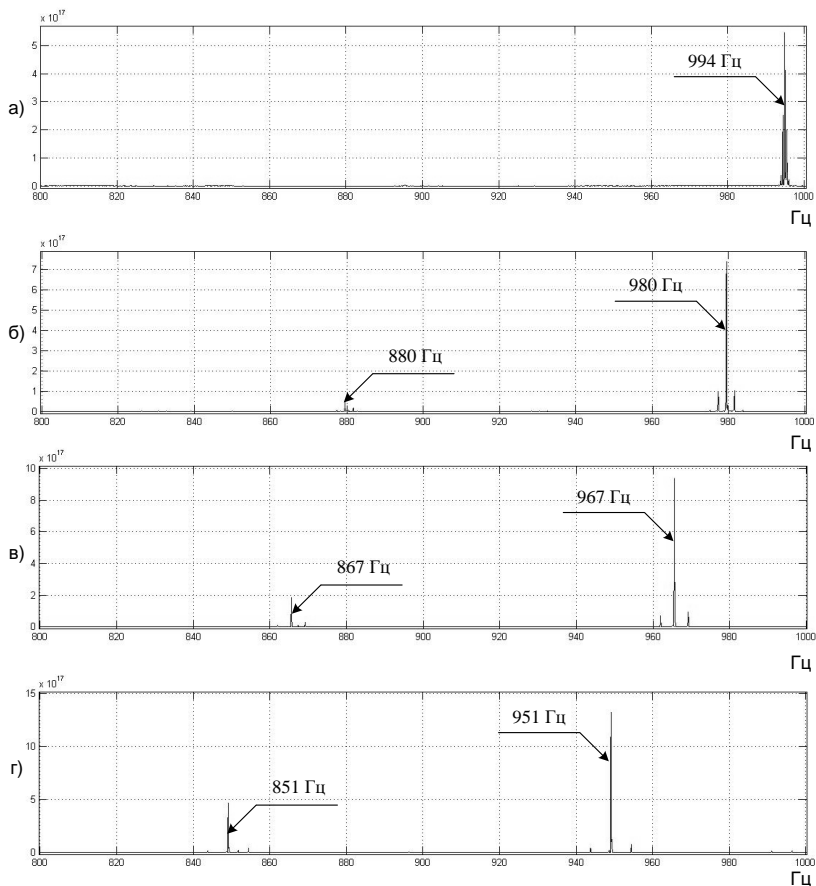


Рис. 4.1. Зубцовые гармоники ротора в спектре внешнего магнитного поля двигателя: а – в режиме холостого хода; б – нагрузка на валу 0,5P_{НОМ}; в – нагрузка на валу P_{НОМ}; г – нагрузка на валу 1,5P_{НОМ}.

На основании полученных экспериментальных данных был разработан метод определения скольжения на основе анализа гармоник внешнего магнитного поля.

Основные положения метода:

1) контроль производится по значениям двух частот ЗГР первого порядка;

2) значения указанных частот определяются по соответствующим им максимумам спектральной плотности мощности сигнала, снимаемого с датчика;

3) верхняя ($f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}, f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1+)}$) и нижняя ($f_{\dot{i}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}, f_{\dot{i}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1+)}$) границы изменения частот ЗГР первого порядка могут быть определены по следующим формулам:

$$f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}(s_{\ddot{a}\ddot{a}} \approx 0) = \frac{Z_p}{p} f_c (1 - s_{\ddot{a}\ddot{a}}) - f_c ; \quad (2)$$

$$f_{\dot{i}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}(s_{i \ddot{a}\ddot{a}}) = \frac{Z_p}{p} f_c (1 - s_{i \ddot{a}\ddot{a}}) - f_c ; \quad (3)$$

$$f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1+)}(s_{\ddot{a}\ddot{a}} \approx 0) = \frac{Z_p}{p} f_c (1 - s_{\ddot{a}\ddot{a}}) + f_c ; \quad (4)$$

$$f_{\dot{i}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1+)}(s_{i \ddot{a}\ddot{a}}) = \frac{Z_p}{p} f_c (1 - s_{i \ddot{a}\ddot{a}}) + f_c ; \quad (5)$$

где $s_{i \ddot{a}\ddot{a}}$ – максимальное значение скольжения, которое с учетом перегрузки и допустимого отклонения скольжения от номинального при номинальной нагрузке машины составляет примерно:

$$s_{i \ddot{a}\ddot{a}} = 1,4 \cdot s_{i \dot{i}} . \quad (6)$$

Длины каждого из рассматриваемых диапазонов изменения частот равны друг другу и определяются по формуле:

$$\Delta f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}} = f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}(s_{\ddot{a}\ddot{a}} \approx 0) - f_{\dot{i}\ddot{a}\ddot{a}}^{(1-)}(s_{i \ddot{a}\ddot{a}} = 1,4 \cdot s_{i \dot{i}}) . \quad (7)$$

Зависимость параметра $\Delta f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}}$ от параметров АД выглядит следующим образом:

$$\Delta f_{\dot{a}\ddot{a}\ddot{a}} = \frac{Z_p}{p} f_c \cdot 1,4 \cdot s_{i \dot{i}} . \quad (8)$$

Разработанный метод определения скольжения по может также использоваться для определения скольжения по току статора или магнитному полю в воздушном зазоре двигателя.

Список литературы

1. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
2. Tavner P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. – The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 543 p.

Разработка программных средств информационной поддержки жизненного цикла импульсно-фазовых электроприводов

В современной высокодинамичной производственной среде жизненно важно максимально эффективно использовать ресурсы, закладываемые в проектируемые изделия. От их правильного использования зависит не только рентабельность и конкурентоспособность продукции, но и скорость подготовки новых изделий, что в настоящее время является определяющим фактором в формировании её конкурентного преимущества. В настоящее время в мире есть ряд бизнес-стратегий, которые позволяют максимально эффективно использовать ресурсы изделий и строить бизнес-процессы таким образом, чтобы производственная цепочка была гибкой и имела прозрачную и четкую структуру.

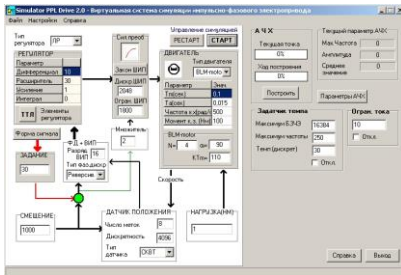
Одна из технологий, признанная во всем мире – ИПИ-технология (Информационная Поддержка Изделия) или CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support). Целью применения CALS-технологий, как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства и пользования продуктом, является повышение эффективности их деятельности за счет ускорения процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах ее эксплуатации и технического обслуживания.

Данная стратегия может быть применена к любой наукоемкой продукции, в том числе и к микропроцессорным импульсно-фазовым электроприводам (ИФЭП), построенных на базе контура цифровой фазовой синхронизации, эксплуатируемых в ряде мехатронных систем, таких как станки с ЧПУ, оптико-электронные комплексы слежения и наведения, универсальные испытательные установки и робототехнические комплексы общепромышленного и специального назначения.

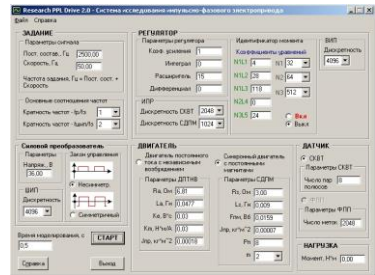
В данной работе приводятся результаты разработок программных средств информационной поддержки жизненного цикла ИФЭП, включающего в себя этапы проектирования, разработки, тестирования, внедрения, эксплуатации, модернизации и утилизации. Разработанные программные средства позволяют автоматизировать большинство функций, осуществляемых в рамках CALS-технологий.

На сегодняшний день, процесс проектирования, включая моделирование, расчеты и программную реализацию алгоритмов управления систем электроприводов осуществляется с применением компьютерных средств и технологий.

Особенности моделирования ИФЭП и выявленные ограничения вычислительного характера, выражающиеся в невозможности практического применения аналитических методов расчета динамических характеристик электропривода, которые приводят к получению математически сложных выражений и малоинформативных результатов, делают необходимым разработку собственных систем исследования и моделирования цифровой имитационной модели электропривода. Также, выявленные ограничения на использование методов численного интегрирования, которые заложены в основу успешно применяющихся на практике универсальных систем моделирования типа Mathcad и Matlab, не позволяют получить высокое быстродействие цифровой модели электропривода. Поэтому предлагаются системы Simulator PPL Drive 2.0 (рис. 1,а) и Research PPL Drive 2.0 (рис. 1, б) для моделирования и исследования ИФЭП, основанные на использовании численно-аналитического метода пространства состояний, позволяющего рассчитывать значения переменных в дискретные моменты времени, соответствующие моментам переключения отдельных блоков электропривода, исключая промежуточные вычисления без потери точности расчета.



а)

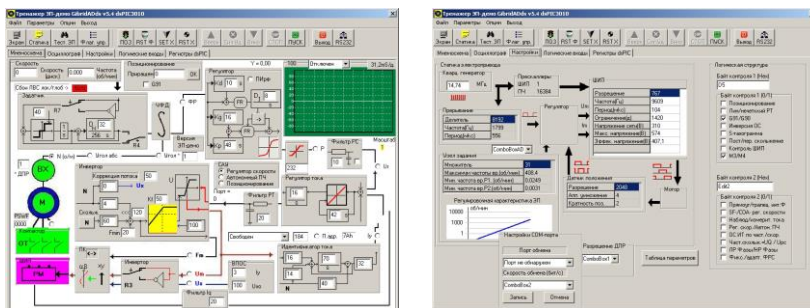


б)

Рис. 1. Внешний вид диалоговых окон систем моделирования и исследования: а - Simulator PPL Drive 2.0; б - Research PPL Drive 2.0

В силу особенностей построения современных ИФЭП, а именно использование специализированных микроконтроллеров в контуре управления, делает необходимой потребность в автоматизации и упрощении процедур настройки цифровых регуляторов и задании физических параметров системы, с учетом технических характеристик, используемых элементов электропривода. Процесс наладки ИФЭП за-

ключается в подборе оптимальных значений регуляторов и вспомогательных управляющих структур системы управления и записи полученных данных в энергонезависимую память микроконтроллера. Непосредственное использование системы команд электропривода является неудобным, сложным для понимания и восприятия процессом, что делает процесс наладки ИФЭП под конкретный объект управления требовательным ко времени и к квалификации инженера-приводчика. Также, к неудобству данного способа наладки можно отнести полное отсутствие визуальных и числовых средств контроля переменных состояния ИФЭП. Для решения указанных проблем, возникающих при наладке и управлении электроприводом, предлагается объектно-ориентированное программное обеспечение Configurator PPL Drive 6.0, основанное на схемо-графическом представлении управляющих структур ИФЭП (рис. 2, а) и программных средств настройки (рис. 2, б) аппаратной части системы управления.



а)

б)

Рис. 2. Внешний вид диалоговых окон системы наладки и управления ИФЭП: а – вид окна с мнемосхемой ИФЭП; б – вид окна задания параметров ИФЭП

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс наладки электропривода, осуществлять оперативное выявление возможных неисправностей, ручное и полуавтоматическое задание параметров ИФЭП, безопасное сохранение оптимальных настроек системы, в случае возникновения неисправностей, визуальный контроль сигналов в режиме online, а также командное управление.

С помощью предлагаемой системы, могут успешно решаться задачи наладки и управления ИФЭП, а также задача обучения персонала основам эксплуатации электропривода. Работа программы Configurator PPL Drive 6.0 может осуществляться в двух режимах:

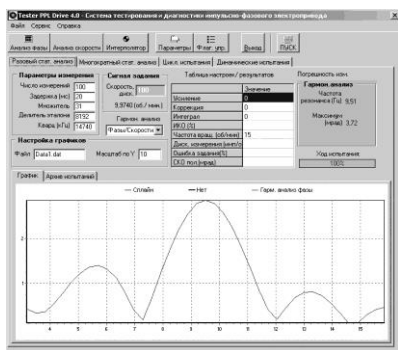
- online – режим непосредственного управления подключенным электроприводом;
- offline – режим симулятора-тренажера.

В режиме тренажера, программа обладает полной функциональностью, за исключением возможности передачи управляющих воздействий на плату электропривода и приема данных по линиям обратной связи. Предлагаемый Offline режим работы позволяет пользователю приобрести практические навыки работы с управляющим интерфейсом, ознакомиться с функциональными возможностями ИФЭП, изучить логическую схему организации ИФЭП и программные органы управления.

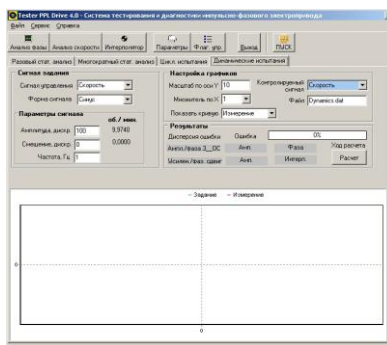
Программа снабжена подробной интерактивной системой документации, состоящей из контекстно-поисковой системы, в виде иерархического дерева с гипертекстовым содержанием. Также, в справочной системе программы встроена контекстная помощь, которая позволяет пользователю оперативно получать интересующую информацию нажатием клавиши F1.

В Online режиме работы, с установленным подключением с микроконтроллером электропривода, программа позволяет организовать взаимодействие с оборудованием электропривода, передавать управляющие команды в микроконтроллер и получать данные с оптического датчика положения, расположенного на валу двигателя. Программа позволяет задавать режимы работы электропривода, управлять скоростью вращения вала двигателя, указывать координаты перемещения для режима позиционирования, а также отображать в виде графиков и числовых значений оперативную информацию о переменных электропривода.

В ходе процессов наладки ИФЭП возникает необходимость испытаний привода в различных динамических режимах, а также анализа статистических показателей его работы. Для автоматизации процессов тестирования ИФЭП была разработана программа Tester PPL Drive 4.0. Графический интерфейс программы имеет набор вкладок (рис. 3), содержащих системы ввода/вывода данных при различных вариантах испытаний электропривода.



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид диалоговых окон системы тестирования ИФЭП: а – вид окна статистических расчетов показателей работы ИФЭП; б – вид окна динамических испытаний ИФЭП

Программа позволяет выполнять следующие функции:

- визуализация характера изменения фазовой ошибки и скорости в квазиустановившихся режимах работы ИФЭП;
- задание режимов тестирования ИФЭП;
- расчет статистических оценок точностных показателей работы ИФЭП;
- автоматическое определение характеристик ИФЭП в заданном диапазоне изменения скорости;
- визуализация характера изменения фазовых переменных системы при периодических сигналах задания разной формы;
- снятие частотных характеристик.

В современных условиях очевиден факт снижения конкурентоспособности таких изделий, которые сопровождаются большим объемом традиционной бумажной документации.

Потребитель продукции является полноправным участником жизненного цикла на этапе эксплуатации изделия. Для перехода на «безбумажную технологию» при создании эксплуатационной документации используются интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР).

ИЭТР представляет собой структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, предназначенный для выдачи в интерактивном режиме справочной и описательной информации об эксплуатационных и ремонтных процедурах, связанных с конкретным изделием. В состав ИЭТР входят БД, где хранится вся информация об изделии, и электронная система отображения для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем. На практике, ИЭТР представляет собой техническое руководство, предоставляемое заказчику в электронной форме либо на оптическом носителе (DVD, CD), либо при помощи сети Интернет со специальным программным средством: электронной системой отображения.

Различные решения в способах представления данных в электронном виде приводят к разным вариантам разделения технических руководств по функциональным признакам. Выделяют пять классов ИЭТР, каждый из которых характеризуется определенными функциональными признаками и стоимостью реализации [4]:

- Индексированные цифровые изображения документов;
- Линейно-структурированные ИЭТР (ИЭТР-L);
- Иерархически-структурированные ИЭТР (ИЭТР-D);
- Интегрированные ИЭТР (ИЭТР-I);
- WEB-ориентированные ИЭТР (ИЭТР-X).

Чем выше класс ИЭТР, тем выше уровень сложности его создания, но это оправдано его возможностями и удобством использования.

Для информационной поддержки, на этапе эксплуатации импульсно-фазовых электроприводов, была разработана система интерактивных электронных технических руководств PPL Drive Suite 2.0, относящаяся к классу IETP-D и состоящая из структурированного хранилища данных и двух программ для редактирования и просмотра руководств.

На стадии концептуального проектирования системы PPL Drive Suite 2.0, вся техническая информация по изделию условно разбивается на два типа: текстовый и медиа. Спецификация изделия, техническое описание деталей, узлов, систем, инструкция по эксплуатации оборудования и т.д. относятся к тестовому типу. Функциональные, структурные, принципиальные электрические схемы, фотографии узлов и оборудования, скриншоты экранов относятся к типу медиа данных.

Физическое хранение двух классов данных в одном месте, например в файле базы данных, на практике трудно реализуемо и не является оптимальным вариантом организации хранилища данных. Поэтому для хранения текстовых и медиа данных используются файл базы данных и файл ресурсов соответственно. В базе данных размещается вся текстовая информация, включая ссылки на медиа данные, расположенные в файле ресурсе. Такая организация хранилища позволяет минимизировать количество медиа файлов, переписываемых на ПК во время установки, а также оптимизировать размер базы данных для осуществления транзакций

Хранилище текстовых данных организовано на базе СУБД MS ACCESS в виде двух файлов баз данных:

- Electroprivod.mdb – является центральной и служит для хранения всей текстовой информации;
- User.mdb – является вспомогательной и служит для хранения пользовательских заметок.

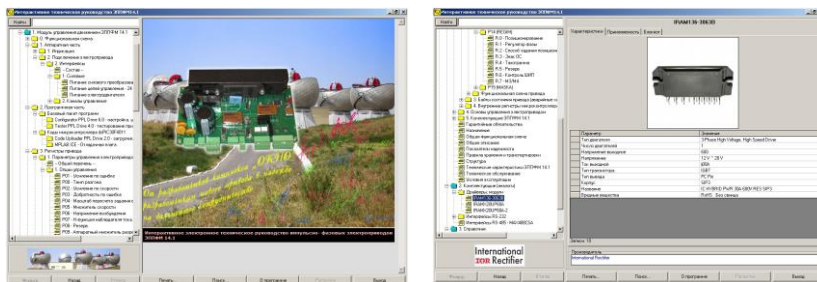
Все основная баз данных закрыта паролем в целях поддержания целостности данных и информационных структур.

Хранилище медиа данных представлено в виде файл контейнера resource.dat. Файл организован в виде строгой последовательности записей содержимого медиа-файлов: фотографий, в форматах *.jpeg, *.gif, и веб-страниц, в формате *.html. Для доступа к медиа файлу, расположенного в хранилище, используются сведения о его размещении:

- стартовой позиции – место начала записи файла, размещенного в общей структуре файла resource.dat;
- длине файла – размер медиа файла указанный в байтах.

Разработанная программа Content Browser PPL Drive Suite 2.0 представляет собой систему отображения информации. Графический интерфейс пользователя (рис. 4) имеет широкие функциональные возможности для организации функций печати, поиска и рассылки электронных писем.

Функциональные возможности программы позволяют пользователю, за минимальное время, находить нужную информацию, получать оформленные печатные отчеты, организовывать оперативную почтовую переписку с поставщиками электронных компонентов, а также обновлять имеющуюся информацию посредством сети Интернет.



а)

б)

Рис. 4. Внешний вид диалоговых окон системы ИЭТР: а – вид основного окна с древовидным рубрикатором; б – вид окна конкретной информационной позиции

Разработанная программа, в первую очередь может представлять интерес организациям, занимающихся непосредственно эксплуатацией ИФЭП, а также может использоваться в качестве информационного инструмента для организаций, оказывающих различные виды услуг в сфере промышленной и электротехнической продукции.

Главным навигационным элементом по информации является панель древовидной структуры. Данный элемент программы позволяет представить всю информацию в виде иерархической структуры, делая работу с информацией наглядной и понятной.

Программа включает в себя ряд функций, таких как:

1. удобная навигация по древовидной структуре данных;
2. быстрый поиск информации при минимальных исходных данных;
3. возможность проведения расширенного поиска, по различным критериям, с возможностью динамического формирования печатных отчетов;
4. вывод информации на принтер, в виде печатных отчетов;
5. организация автоматизированной рассылки электронных писем;
6. быстрый переход по взаимосвязанным информационным позициям организован в виде гиперссылок;
7. контекстно-зависимый пользовательский блокнот для каждой информационной позиции.

Программа позволяет осуществить переход на так называемую «безбумажную технологию» и поддерживать актуальность имеющейся информации об изделии на протяжении всего этапа эксплуатации благодаря современным средствам удаленной передачи информации.

Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять большинство функций по организации информационной поддержки жизненного цикла ИФЭП, осуществляемого в рамках CALS-технологии. Весь набор созданных программных средств показал высокую эффективность и гибкость при осуществлении процессов проектирования, наладки, тестирования, управления и модернизации ИФЭП.

Представленные программы позволяют лишь частично автоматизировать выполнение возложенных на них функций, оставляя открытыми вопросы интеллектуализации и автономности работы систем информационной поддержки ИФЭП.

Основной задачей дальнейших разработок является создание интеллектуальных средств сбора, накопления, хранения и анализа данных, для повышения надежности и автономности работы систем электроприводов.

В качестве конкретных предложений для проработки и исследования, можно выделить следующие:

- автоматическая настройка ИФЭП под конкретный технологический агрегат. Концептуально, данное предложение может быть оформлено в виде нейросетевой модели ИФЭП, имитирующей основные процессы, протекающие при работе реальной системы с определенной степенью адекватности, достаточной для автоматизированного подбора оптимальных параметров в режиме online. Непосредственное использование получаемых с помощью нейросети оптимизированных параметров для управления электроприводом, возможно только при успешно обученной нейросети, когда функция ошибок сети лежит в указанных пределах. Процесс поиска оптимума нейронной моделью носит итерационный характер и действует N-ое количество раз, пока алгоритм обучения сети не подберет оптимальные весовые коэффициенты нейронов.

Преимущество автоматической настройки параметров регуляторов не является основанием для исключения вмешательства эксперта при принятии окончательного решения. Поэтому предложенное усовершенствование позволяет лишь сократить время подбора оптимальных значений регуляторов электропривода. Окончательная настройка и проверка корректности параметров остается за человеком.

– разработка, наполнение и поддержание информационного интернет портала по импульсно-фазовым электроприводам. Предлагаемый портал по электроприводам является интегрирующим звеном единой информационной среды для всех участников жизненного цикла импульсно-фазовых электроприводов. Задача портала состоит в оказании информационных услуг субъектам, являющихся участниками жизненного цикла рассматриваемых систем и снижения временных затрат на поиск необходимой информации.

– средств удаленного доступа через сеть Интернет. Для реализации данной возможности необходимо создание клиент-серверного приложения. На практике, программная реализация может быть представлена в виде отдельного модуля-службы, находящегося в памяти компьютера и имеющей определенный номер виртуального порта для приема/передачи информации.

– организация системы сбора данных с реально работающего электропривода в режиме online. Собственным решением данной задачи может являться отдельный программный модуль для периодического опроса регистров микроконтроллера и средств буферизации поступающей информации для ее дальнейшей записи в хранилище данных.

– создание структуры и логики функционирования единого хранилища данных для накопления и хранения данных, поступающих с работающего ИФЭП. Создаваемая структура данных является информационной моделью ИФЭП, отражающей логику работы системы, циркуляцию информационных потоков и связи между элементами.

– создание экспертной системы оценок и разработка методов принятия решений для выдачи практических рекомендаций и советов при эксплуатации ИФЭП.

Практическая реализация предложенных средств и методов требует от специалиста-разработчика широкого технического кругозора и большого практического опыта. Для комплексного решения поставленных задач требуются дополнительные исследования, разработки и эксперименты, которые могут быть продолжены в дальнейшей работе.

Д.В. РАКУТИНА, Е. Н. Бушуев

Применение зональных методов для расчета радиационного и сложного теплообмена в теплотехнологических установках

Цель работы - выбор и применение наиболее эффективной модификации зонального метода для решения конкретных практических за-

дач по определению температурных полей и тепловых потоков в рабочем пространстве теплотехнологических установок.

В качестве объекта исследования был выбран класс туннельных печей, которые широко применяются в промышленности для термообработки керамических изделий производственного и бытового назначения. Тепловой расчет таких печей производится, как правило, по уравнениям теплового баланса и стационарной теплопередачи без учета особенностей геометрических размеров садки, её внутреннего строения и изменения физических свойств материала в процессе нагрева, обжига и охлаждения. Существующие методики расчета длительности процесса термообработки для отдельных интервалов температур базируются на эмпирических данных и недостаточно точны для разработки режимов обжига изделий. Для повышения качества проектирования туннельных печей и выбора рациональных режимов термообработки изделий необходимо создавать математические модели, позволяющие находить распределение температур и тепловых потоков одновременно в садке, рабочем пространстве печи и её ограждениях, т.е. решать сопряженные тепловые задачи.

В настоящей работе разработана математическая модель сопряженного теплообмена в туннельной электрической печи сопротивления.

Туннельная электрическая печь предназначена для обжига абразивных кругов на керамической связке. Режим работы печи квазистационарный. По длине печь делится на три зоны: нагрева, обжига и охлаждения. Отопление первых двух зон ведут карбид-кремниевыми нагревателями. Печь имеет три яруса по высоте: верхний, средний и нижний. Электрические нагреватели установлены в каждом ярусе. Садка состоит из уложенных друг на друга абразивных кругов, которые перемещаются вдоль печи на специальной плите. При этом между обжигаемыми изделиями и плитой-основанием находится порошкообразная прослойка из электрокорунда. Одновременно в печи может находиться 28 плит с заготовками.

Математическое моделирование тепловой работы данной печи основано на совместном решении задач внешнего и внутреннего теплообмена.

Моделирование внешнего теплообмена в двухцелевой электрической печи выполнено на основе резольвентного зонального метода расчета, устанавливающего непосредственную связь потоков результирующего излучения с температурами.

Целью решения внешней задачи является определение результирующих тепловых потоков на поверхностях абразивных заготовок и нижних поверхностях плит, необходимых для расчета температурного

поля садки в процессе термообработки, т.е. для решения внутренней задачи.

Целью решения задачи внутреннего теплообмена является расчет нестационарного температурного поля в садке при неоднородных граничных условиях.

Для решения задачи внутреннего теплообмена в печи была выделена повторяющаяся область, состоящая из стопки абразивных кругов и части плиты-подины, на которой они установлены.

Температурное поле абразивных кругов и опорной плиты рассчитано с учетом геометрической формы садки и термического сопротивления промежуточных слоев из порошкообразного электрокорунда.

Решение задачи внутреннего теплообмена выполнено методом сеток по неявной конечно-разностной схеме. Двумерное температурное поле полого цилиндра найдено методом мелких шагов.

Разработанная математическая модель тепловой работы туннельной электрической печи реализована в виде вычислительной программы на языке программирования Delphi 7 (рис. 1). Программа включает в себя блок ввода исходных данных и вывода результатов расчета и ядро программы – совокупность вычислительных процедур.

Входными параметрами модели являются: размеры рабочего пространства печи и обжигаемых изделий, теплофизические свойства абразивного материала и футеровки печи, размеры и мощность электрических нагревателей, скорость перемещения обжигаемых изделий в печи (производительность печи). В результате расчета получаем двумерное температурное поле и температурную кривую обжига абразивных кругов, под которой понимают изменение среднemasсовой температуры садки по длине печи. При этом в верхней части окна «Результаты расчета: температурный режим обжига» выводится информация о мощности печи, частоте толканий, строении садки и средней скорости нагрева и охлаждения обжигаемых изделий.

Адекватность разработанной математической модели проверена путем сопоставления с данными промышленных испытаний проходной электрической печи. Сопоставление результатов расчета температурного поля садки с экспериментальными данными показало, что величина максимальной относительной погрешности расчета температуры не превышает 10 %.

Разработанный программный комплекс может быть использован в учебном процессе ИГЭУ для исследования режимов обжига керамических изделий в туннельной электрической печи при курсовом и дипломном проектировании.

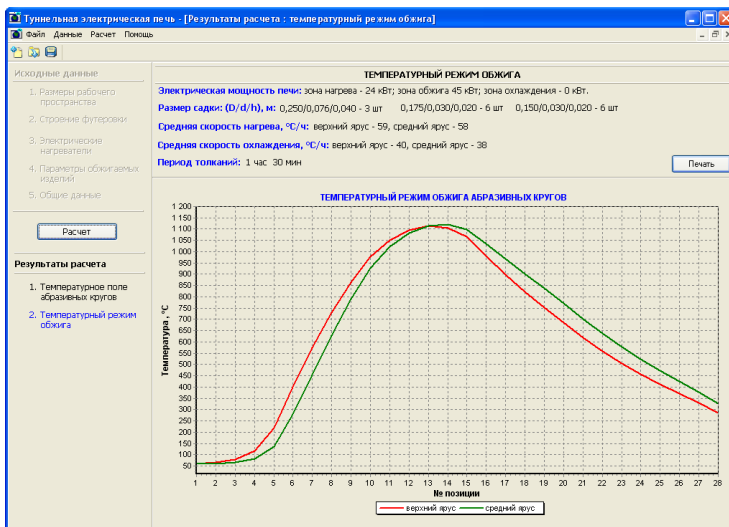


Рис. 1. Рабочее окно программы расчета тепловой работы туннельной электрической печи

Экономический эффект возможен при передаче разработанных программных продуктов заинтересованным предприятиям для использования при проектировании и наладке печей указанного типа.

Основные выводы и результаты работы:

1. Разработан программный комплекс для расчета радиационного и сложного теплообмена в туннельной электрической печи, позволяющий выбирать рациональный режим работы этой установки.

2. Проведена настройка математической модели: подобраны коэффициенты релаксации, параметры разностной сетки, исследована устойчивость решения сопряженной задачи сложного теплообмена в туннельной печи.

3. Адекватность математической модели проверена путем сопоставления с результатами экспериментального исследования режима обжига керамических изделий в туннельной электрической печи. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

Литература

1. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена // Тезисы докладов VI Минского международного форума по тепло- и массообмену, 19-23 мая 2008 г., с. 193-194.

Д. В. Рубцов, А. И. Тихонов

Усовершенствование конструкции магнитоэлектрического однофазного ветрогенератора на основе анализа физических полей

Использование ветроустановок для получения электрической энергии делает задачу создания простого в эксплуатации генератора актуальной. Основным требованием так же является технологичность процесса изготовления и невысокая стоимость ветрогенератора торцевой конструкции.

Для ветрогенератора была разработана методика моделирования физических процессов с прямым обращением к библиотеке конечно-элементного расчета магнитного поля. На первом этапе происходит предварительный расчет геометрии и параметров ветрогенератора по инженерной методике, основанной на приблизительном расчете магнитного поля по средней силовой линии. Для новых конструкций электрических машин такой расчет может нести в себе существенную погрешность.

Данные, полученные по инженерной методике, являются входными параметрами для подсистемы генерации конечно-элементной модели. Меняя параметры, например, количество зубцов и полюсов, а также их размеры, можно получать и исследовать модели серии однотипных устройств. Отдельным параметром задавалось положение ротора относительно статора (угол поворота). Конечно-элементная модель представляет собой двумерную развертку торцевой машины по средней цилиндрической поверхности.

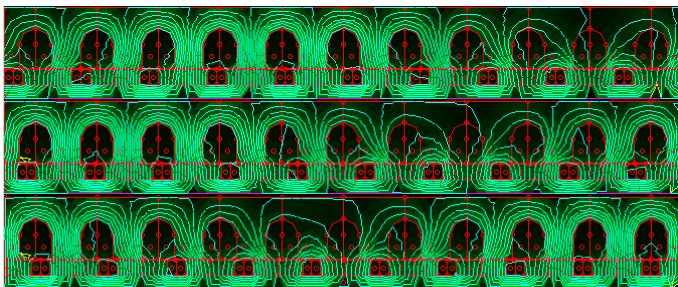


Рис.1 Изменение КЭ модели и картины магнитного поля при перемещении ротора

На следующем этапе происходит перемещение определенных массивов модели относительно друг друга. Таким образом, организуется процесс вращения ротора, при этом регенерации подвергается область воздушного зазора и ротора (рис. 1). Снова происходит расчет магнитного поля, результаты поступают на вход подсистемы обработки данных и вход системы регенерации КЭ модели.

Совершив ряд итераций, мы получаем полную динамическую картину магнитного поля генератора в режиме холостого хода. При этом расчет по этой методике будет учитывать не только фактор нелинейности магнитных характеристик стали и взаимовлияние магнитных полей, создаваемых различными обмотками и постоянными магнитами, но и конструктивные особенности активной области машины.

Процедуры, позволяющие организовать численный эксперимент, реализованы в среде MathCad с использованием подключаемой библиотеки конечно-элементного моделирования, разработанной на кафедре Электромеханики ИГЭУ.

С использованием модели было проведено исследование зависимости числа катушек и способов их укладки на выходное напряжение генератора. Серия численных экспериментов проводилась для 6 и 10 полюсной машины с соответствующими числами пазов на статоре 4-11 для 6 полюсов (рис. 2) и 9-14 для 10 полюсов (рис. 3). Для каждого шага определялась величина потокосцепления обмотки статора с полем ротора - ψ . В результате формировалась кривая зависимости $\psi(\alpha)$, где α – угол поворота ротора. Численное дифференцирование кривой $\psi(\alpha)$ дает величину ЭДС, наводимую в обмотках статора.

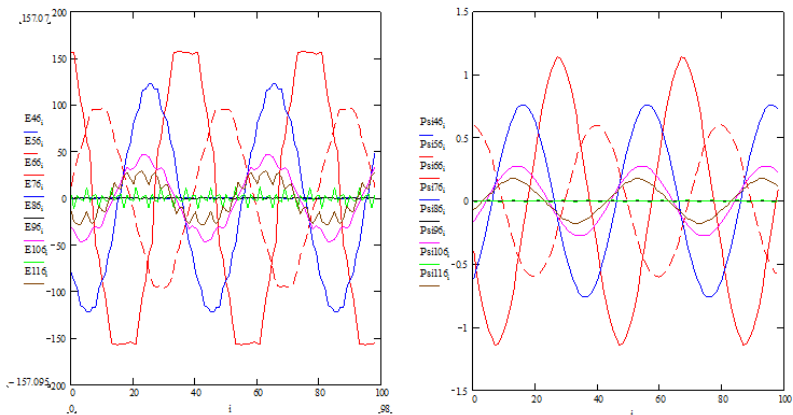


Рис. 2 Кривые изменения ЭДС и потокосцепления для 4,5,6,7,8,9,10,11 пазов и 6 полюсов

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждается положение о получении максимальной ЭДС при равном количестве пазов и полюсов, но данный вариант неприемлем из-за эффекта «магнитного залипания» статора и ротора (E66 рис. 2, E1010 рис. 3).
2. При нечетном количестве пазов ЭДС уменьшается с ростом отличия числа пазов и полюсов.
3. Наиболее оптимальным соотношением следует признать число пазов $Z=2p\pm 1$. А при $Z=2p-1$ достигается большая экономия меди.

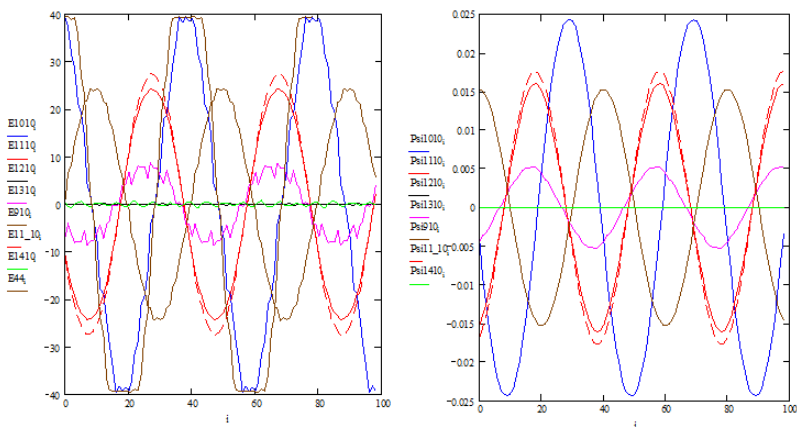


Рис. 3 Кривые изменения ЭДС и потокосцепления для 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 пазов и 10 полюсов

4. Для оптимальных соотношений чисел пазов и полюсов (при разных числах полюсов 5, 7, 9, 11) при уменьшении числа полюсов потокосцепление обмоток и ЭДС увеличиваются (рис. 4). Так же рекомендуется использовать меньшее число полюсов и по технологическим соображениям.

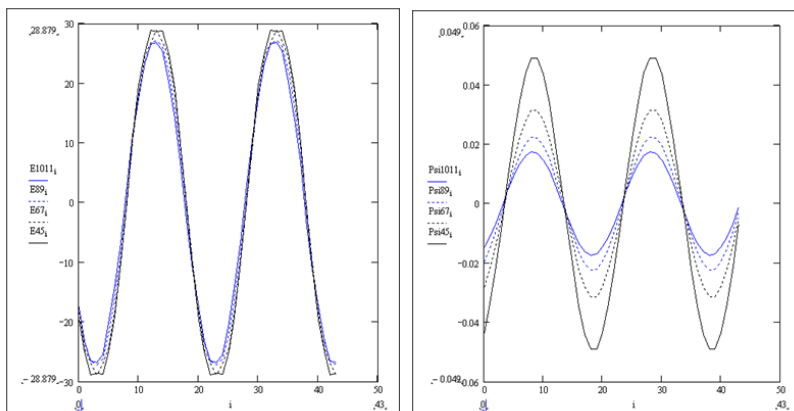


Рис. 4 Кривые изменения ЭДС и потокосцепления для разного соотношения числа пазов к числу полюсов

С применением результатов методики проведения численного эксперимента была откорректирована и распространена на широкий класс задач (высокоскоростные генераторы, конструкция генератора с полюсами на роторах по обеим сторонам статора, конструкция генератора с гладким статором) инженерная методика расчета.

Работа получит свое дальнейшее развитие в направлении совмещения конечно-элементной модели и модели электрической цепи (с использованием пакета Simulink). Это позволит провести численные эксперименты в режимах работы под нагрузкой, короткого замыкания и т.д. Использование многопроцессорной техники (или графических процессоров CUDA) поможет ускорить процесс расчета конечно-элементной модели и провести работы по оптимизации геометрии машины.

Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена

Целью работы является исследование эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена. Научная новизна работы состоит в создании алгоритма выбора наиболее эффективной модификации зонального метода для конкретной постановки задачи. По теме инновационного исследования опубликован доклад [1]. По результатам работы сделан доклад на 6-ом Минском международном форуме по Тепломассообмену. Кроме этого, приняты тезисы доклада на конференцию студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, февраль 2009 года) и тезисы доклада на Международную научную конференцию «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, Казань, апрель 2009 года).

Одной из актуальных проблем вычислительной теплофизики является разработка эффективных численных методов, позволяющих получать решение задачи с заданной точностью при минимальном объеме вычислений. Именно в этом направлении происходит развитие зональных методов, нашедших широкое применение в инженерных расчетах радиационного и сложного теплообмена [2-4].

Идея зонального метода заключается в разбиении системы, в которой происходит теплообмен, на объемные и поверхностные зоны (достаточно малые участки, в пределах которых все теплофизические характеристики можно приближенно считать постоянными).

В пределах каждой поверхностной зоны, имеющей площадь F_i , считаются постоянными температура T_i , степень черноты ε_i , поглощательная способность A_i и плотность потока падающего излучения $q_i^{\text{пад}}$. Собственное и эффективное излучение поверхностных зон считается диффузным.

В пределах каждой объемной зоны, имеющей объем V_i и ограниченной воображаемой поверхностью F_i , постоянными считают температуру среды T_i и другие факторы, влияющие на ее радиационные характеристики, в частности, содержание поглощающе-излучающих компонентов. Объемное излучение среды заменяют диффузным излучением поверхности F_i , которой приписывают степень черноты, обеспечивающую действительное значение потока собственного излучения объемной зоны.

При пренебрежении рассеянием излучения отражательная способность объемной зоны полагается равной нулю. В зависимости от того, какая величина – температура или поток результирующего излучения – является заданной по условию, зоны классифицируют на зоны 1-го, 2-го и 3-го рода. Для зон 1-го считают заданной температуру, для зон 2-го

рода – поток результирующего излучения. Для зон 3-го рода, возникающих в случае сложного теплообмена, записывают уравнения теплового баланса, каждое из которых связывает поток результирующего излучения с температурами и может быть представлено в следующем виде:

$$Q_i^p + \sum_k h_{ki} T_k + h_i^0 = 0; \quad (1)$$

где h_{ki}, h_i^0 – коэффициенты, определяющие конвективные и кондуктивные тепловые потоки; знак \sum означает суммирование по всем зонам. Обозначим число зон 1-го рода символом l_1 , 2-го рода – l_2 и 3-го рода – l_3 ($l = l_1 + l_2 + l_3$).

Целью расчета является определение:

- потоков результирующего излучения Q_i^p для зон 1-го рода;
- температур T_i (или потоков собственного излучения $Q_i^{\text{соб}} = \varepsilon_i \sigma_0 T_i^4 F_i$) для зон 2-го рода; – потоков результирующего излучения Q_i^p и температур T_i для зон 3-го рода.

В основе различных вариантов зонального метода лежат соотношения вида

$$Q_i^{\text{пад}} = \sum_k Q_k Z_{ki}, \quad i = 1 \dots l, \quad (2)$$

представляющие потоки излучения, падающие на каждую i -ую зону, в виде разложения по некоторой базисной совокупности потоков излучения Q_k ($k = 1 \dots l$) всех зон, образующих рассматриваемую систему; коэффициенты Z_{ki} – коэффициенты разложения.

При применении классического зонального метода в качестве базисной используют совокупность потоков эффективного излучения ($Q_k \equiv Q_k^{\text{эф}}$). В рамках резольвентного зонального метода потоки эффективного излучения исключают из рассмотрения, а падающие потоки связывают непосредственно с потоками собственного излучения ($Q_k \equiv Q_k^{\text{соб}}$). При использовании модифицированного резольвентного зонального метода [5,6] в качестве базисных потоков используют потоки собственного излучения для зон 1-го и 3-го рода и потоки результирующего излучения (взятые с обратным знаком) для зон 2-го рода.

Применение классического, резольвентного и модифицированного резольвентного зональных методов возможно как при решении задач чисто радиационного, так и при решении задач сложного теплообмена. При решении задач чисто радиационного теплообмена классический

зональный метод по эффективности не уступает или даже превосходит другие возможные способы расчета.

Особенности расчета сложного теплообмена обусловлены наличием зон 3-го рода, появляющихся, в частности, при учете конвективного переноса тепла движущимися газами и переносом тепла теплопроводностью в ограждениях рабочего пространства высокотемпературных теплотехнологических и теплоэнергетических агрегатов. Преимущество резольвентных зональных методов в данном случае заключается в их более высокой эффективности, обусловленной существенным уменьшением размерности системы нелинейных зональных уравнений, а также возможностью применения итерационного метода Ньютона для ее решения.

Другое направление повышения эффективности зональных методов связано с принятием дополнительных упрощающих допущений. При расчете температуры объемной зоны излучение смежных с ней объемных зон можно заменить излучением условных абсолютно черных поверхностей – “граней”. Существенное упрощение расчета обусловлено исключением из рассмотрения обобщенных угловых коэффициентов излучения между зонами, разделенными более чем одной объемной зоной.

Исследование эффективности зональных методов расчета находится в зачаточном состоянии и далеко от своего завершения.

Литература

1. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. *Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена. Труды IV Международного форума по тепло- и массообмену. (19-23 мая 2008 г., Институт тепло- и массообмена Им. А.В. Лыкова НАН Беларуси), 2008. – 193-194 с.*

2. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. *Металлургическая теплотехника: развитие теоретического раздела // Изв. вузов. Черная металлургия, 2005, №10, С. 58-62.*

3. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. *Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Металлургия, 1990, 239 с.*

4. Крупенников С.А. *Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации // Изв. вузов. Черная металлургия, 2006, №3. – С.59-62.*

5. Крупенников С.А. *Модификация зонального метода для расчета радиационного теплообмена // Изв. вузов. Черная металлургия, 1992, №1, С.102–103.*

6. Крупенников С.А. Применение модифицированного зонального метода для расчета сложного теплообмена // Изв. вузов. Черная металлургия, 1995, №5, С.46–49.

7. Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде // Изв. вузов. Черная металлургия, 1999, №1. – С.68-70.

8. Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Оценка погрешности упрощенного метода расчета радиационного теплообмена // Изв. вузов. Черная металлургия, 1999, №4. – С.75-76.

Е.А. Шуина, В. Е. Мизонов

Математическое моделирование и оптимизация перемешивания дисперсных систем методами теории цепей Маркова

Процессы смешивания сыпучих порошкообразных материалов широко распространены в химической, фармацевтической, строительной, пищевой и других отраслях промышленности. От качества получаемых смесей, главным образом, от их однородности напрямую зависят потребительские свойства производимых из них изделий. Переработка некоторых сыпучих материалов известна в практике человеческой деятельности с незапамятных времен, но научные и инженерные основы этих технологий стали предметом исследования лишь в предыдущее столетие. Это связано с резким ростом объемов перерабатываемых материалов и разнообразия их видов, когда нарабатанный в течение столетий методом проб и ошибок опыт уже перестал удовлетворять запросам развивающихся производств. Однако успехи в этом направлении по сравнению, например, с механикой жидкости и газа до настоящего времени более чем скромны.

Сложность, а во многих случаях и неопределенность физико-механических свойств сыпучих материалов привели к тому, что полные строгие уравнения их движения, наподобие уравнений движения жидкости и газа, до настоящего времени не сформулированы, по крайней мере, в таком виде, который считался бы общепризнанным. Поэтому экспериментальное исследование промышленных машин и аппаратов по их переработке во многих случаях остается единственной надежной основой методов их расчета и проектирования. Однако даже незначительные конструктивные изменения в исследованном аппарате с ожидаемой целью повышения его эксплуатационных характеристик требуют повторения всего объема экспериментальных исследований и приводят к дополнительным затратам средств и времени, что во многих случаях неприемлемо для динамично развивающихся производств. Значительную помощь в преодолении этого противоречия могут оказать математические модели процессов с участием сыпучих сред.

Целью настоящей работы является полная компьютерная картина эволюции состояния смеси в смесителях периодического и непрерывного действия с возможностью управления кинетикой процесса через параметры перемешивания с разными масштабами и выход на прямые рекомендации по рациональным формам и режимам движения рабочих органов.

Предлагаемый подход к решению данной проблемы основан на том, что процесс перемешивания и эволюция состояния смеси рассматривается как прохождение сигнала через дискретизированную распределенную систему, обладающую нелинейными свойствами. В качестве математического инструмента описания процесса используется теория цепей Маркова. К настоящему времени разработана общая стратегия использования математического аппарата теории цепей Маркова для моделирования процессов в дисперсных средах, выполнено моделирование ряда процессов в упрощенной постановке задачи, в 2000-2007гг проведены экспериментальные исследования промышленного смесителя и стендовых объектов (во Франции), которых в первом приближении достаточно для эмпирического обеспечения и проверки адекватности моделей.

При смешивании сыпучих материалов часто возникает необходимость смешать компоненты, склонные к сегрегации друг относительно друга. Процесс осложняется еще и тем, что поток компонентов и смеси часто неоднороден в поперечном направлении, например, пристенные слои потока, побуждаемые к движению смешивающими лопастями, движутся быстрее, чем его ядро. Была поставлена задача выявить влияние поперечной неоднородности потока и склонности ключевого компонента к сегрегации на кривую распределения времени пребывания ключевого компонента в смесителе на основе математической модели. Процессу поставлена в соответствие двухмерная прямоугольная цепь ячеек. В вероятностях переходов между ячейками выделена чисто случайная (диффузионная) составляющая и конвективная составляющая. В горизонтальном направлении последняя обусловлена транспортом материала, а в вертикальном – возможной сегрегацией ключевого компонента. Число рядов ячеек заранее не является заданным и определяется массой материала в смесителе. Модель позволяет установить зависимость производительности от этой массы и, наоборот, по виду этой зависимости, относительно легко получаемой экспериментально, судить о поперечной неоднородности потока в смесителе. Кривая распределения времени пребывания рассчитывается как последовательные выходы в абсорбирующую ячейку долей единичной порции трассера (ключевого компонента), помещенного в начальный момент времени на входе в аппарат. Наличие поперечной неоднородности приводит к деформации кривых распределения, которые с ее ростом переходят в бимодальные распределения. Сегрегация трассера в зависимости от ее направления может усилить или ослабить тенденцию к бимодальности. Модель была применена для описания экспери-

ментальных кривых распределения времени пребывания, полученных на лопастном смесителе непрерывного действия Gericke-500, и установления связи их параметров с параметрами процесса. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных кривых, что позволяет положить ее в основу метода расчета смесителя.

Предложены методы уменьшения негативного влияния сегрегации, препятствующей получению смесей с высокой однородностью распределения компонентов. Одним из возможных путей решения этой задачи является распределенная во времени подача сегрегирующего ключевого компонента в смесь: или непрерывно, или малыми дискретными порциями. В этом случае смесь формируется как суперпозиция запаздывающих друг относительно друга распределений ключевого компонента, причем суммарное распределение оказывается гораздо более равномерным, чем максимально достижимое при его разовой подаче. При моделировании и оптимизации процессов смешивания в большей степени интересует не механизм сегрегации, а ее скорость, так как именно она определяет формирование качества смеси. Вместе с тем, нельзя говорить о сегрегации одних частиц в ансамбле других, так как эта ситуация имеет место только в начальный момент времени, когда компоненты смеси полностью разделены. По мере развития процесса смешивания сегрегация уже идет в смеси, то есть при повышенной концентрации ключевого компонента. Сегрегация является в принципе нелинейным процессом, и построить ее теоретическую модель крайне затруднительно. Для выявления основных закономерностей влияния концентрации на скорость сегрегации были выполнены экспериментальные исследования эволюции концентрации склонных к сегрегации компонентов в цилиндре, совершающем вертикальные колебания. Было показано, что скорость сегрегации изменяется от некоторого значения, определяемого свойствами компонентов при малой концентрации, до практически нуля при приближении концентрации к предельной. Использование полученных эмпирических зависимостей в ячеечной модели процесса позволило значительно повысить достоверность расчетных прогнозов.

Другим подходом к подавлению негативного влияния сегрегации, обусловленной силой веса, путем использования нестационарной центробежной силы в противоположном весу направлении. В частности, это было реализовано в вибрационном смесителе, рабочий барабан которого совершает вращательные колебания на шарнирном подвесе с такой частотой, что среднее за период значение центробежной силы равно силе веса смеси, то есть отсутствует среднее значение силы, направленной вниз и вызывающей сегрегацию, а компоненты смеси реализуют чисто диффузионное перемешивание. На новую конструкцию смесителя получен патент РФ.

Предложенная стратегия моделирования процессов смешивания и ее программно-алгоритмическое обеспечение может быть использована при моделировании не охваченных в работе вариантов организа-

ции этих процессов, а также при моделировании смежных процессов (псевдооживленный слой, аэродинамическая классификация и др.).

Разработанные подходы к построению математических моделей процессов в дисперсных средах и программно-алгоритмическое обеспечение моделирования процессов смешивания нашли применение в практике выполнения промышленных и исследовательских проектов в горном институте г.Алби, Франция, Ченстоховском политехническом институте, Польша, университете г. Веспрем, Венгрия, и исследовательском центре Tel-Тек, Норвегия.

А.А. Ражева, А.А. Белов

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ УЧЕБНЫМ ПРОЦЕССОМ

В настоящее время социально-экономическая система находится в крайне неравновесном, бифуркационном состоянии. В такой обстановке для сохранения устойчивой позиции на рынке, предприятиям требуются развитые способности к адаптации к условиям внешней среды. Такие способности могут возникнуть только благодаря сотрудникам предприятия. Ни оборудование, ни машины, ни какие-либо другие материальные ресурсы не способны придать организации адаптационные свойства. Они достигаются только благодаря знаниям, которыми владеет персонал. Только экономика, основанная на знаниях, может обеспечить конкурентные преимущества организации. Причем новые, нестандартные условия вынуждают применять совершенно новые знания, тем самым переводя компании в сферу инновационной экономики.

Таким образом, проблема развития и управления интеллектуальным потенциалом предприятия очень актуальна в настоящее время и требует эффективного решения. Важно учесть, что развитие интеллектуальных способностей персонала – это непрерывный процесс, начало которого относится еще к подготовке в ВУЗе. Поэтому требуется универсальная система, которая бы охватывала различные этапы обучения.

В настоящее время предлагаются разнообразные подходы, методы и технологии, которые направлены на управление знаниями обучаемых. Но в основном, это однонаправленный процесс, который не учитывает развитие другой стороны – обучающей. Требуются новые решения, которые целостно подходят к вопросу управления учебным процессом и его совершенствованию.

Одним из решений обозначенной проблемы предлагается подход к управлению процессом обучения, который оформился в концепцию управления интеллектуальным развитием организации [1]. Он основан на принципах теории автоматического управления и онтологиче-

ской концепции управления знаниями, а его методической поддержкой служит структурно-интегративный подход к оценке и управлению интеллектом. Концептуально постановка задачи управления подготовкой специалистов при таком подходе выглядит следующим образом (рис. 1).

При такой постановке задачи осуществляется непрерывное совершенствование каждого контура управления, начиная от управления знаниями сотрудников-исполнителей, через повышение квалификации управленческого персонала и заканчивая управлением бизнес-процессами предприятия. При этом, предлагаемая система отвечает принципам управления: схема содержит основной контур (первый) и два корректирующих (второй и третий), а метод ее поддержки позволяет формализовано подойти к процессу управления подготовкой специалистов. С его помощью осуществляется строгая параметризация предметной области и проводится получение оценок, отражающих состояние объекта управления.

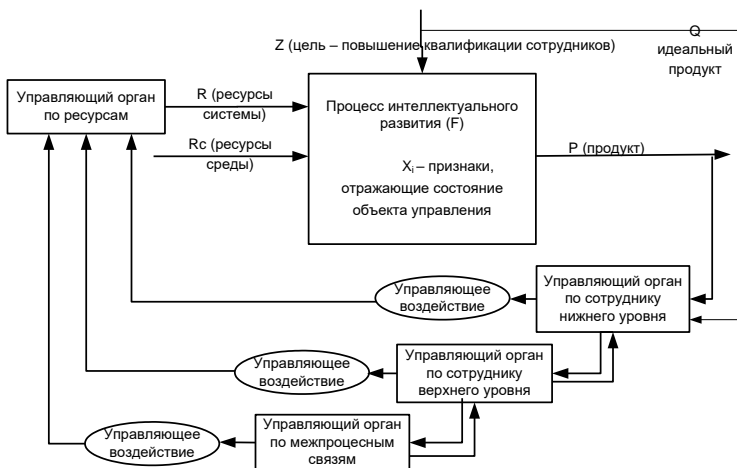


Рис. 1. Схема процесса управления интеллектуальным развитием организации

В соответствии с предложенным подходом была разработана автоматизированная система «Intellect-Pro 2.0», осуществляющая его программную поддержку. Основное назначение указанной системы – поддержка принятия решений по двум первым контурам управления.

В состав системы входят шесть основных и один вспомогательный модуль (рис. 2):

- Модуль 0. Заполнение системных справочников;

- Модуль 1. Управление иерархическими понятийными структурами;
- Модуль 2. Формирование контрольных файлов;
- Модуль 3. Проведение контроля знаний;
- Модуль 4. Обработка результатов контроля знаний;
- Модуль 5. Формирование управляющих решений и воздействий по объекту управления;
- Модуль 6. Оценка эффективности проведенных управляющих воздействий.

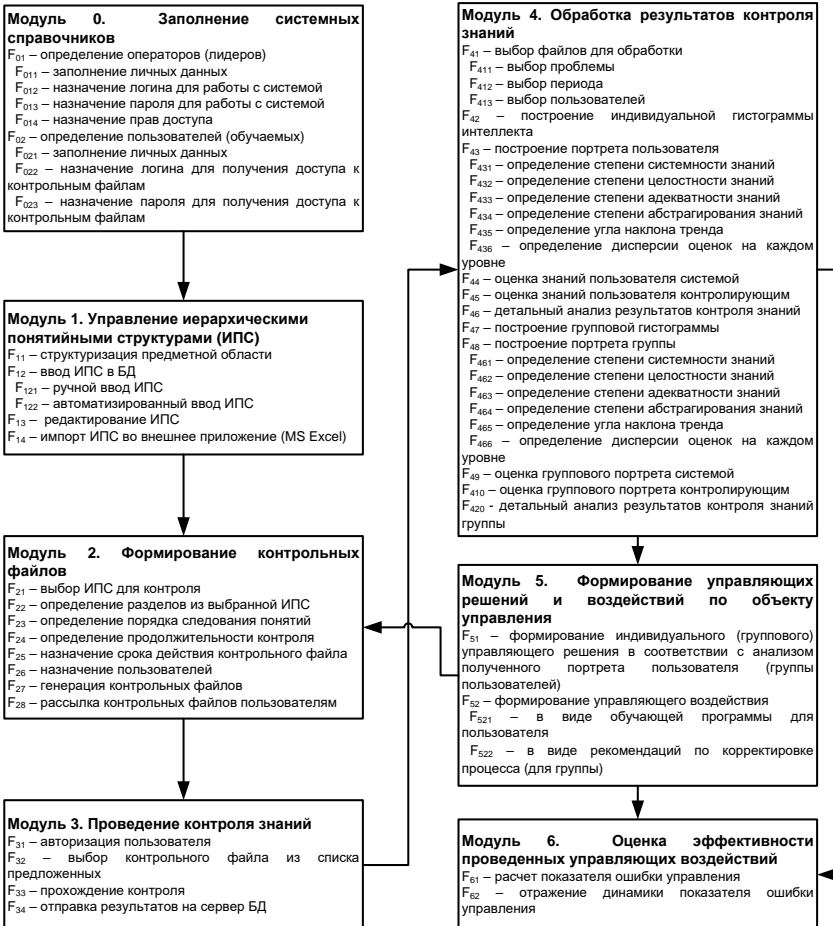


Рис. 2. Модульное строение автоматизированной системы «Intellect-Pro 2.0»

Специфика образовательного процесса в ВУЗе не имеет существенных отличий от процесса обучения сотрудников на предприятии. Искусственно создаваемые условия аналогичны реально решаемым задачам. Поэтому верификацию разработанного метода и средств его поддержки целесообразно было провести при управлении учебным процессом в ВУЗе.

Рассмотрим применение предложенной системы управления в учебном процессе. В соответствии с концепцией были разработаны иерархические понятийные структуры (ИПС) по дисциплинам «Математические основы принятия решений», «Системы поддержки принятия решений», «Организационное проектирование» (в 2-х частях), «Офисные технологии: бухгалтерский учет». На их основе с помощью метода иерархических понятийных структур проводились и проводятся в настоящее время контроли знаний студентов в рамках промежуточных контролей. Информация, получаемая в результате особой обработки данных по контролям, служит основой для принимаемых по объекту управления решений. Решения могут быть следующих типов:

- по управлению знаниями студентов;
- по совершенствованию знаний преподавателей;
- по корректировке организации учебного процесса в рамках рассматриваемых дисциплин.

На базе принятого решения формируется управленческое воздействие, которое представляет собой конкретную программу действий по реализации решения. После выполнения назначенных предписаний, проводится оценка проведенных действий.

Применение системы при управлении учебным процессом показало положительные результаты как в аспекте улучшения успеваемости студентов, роста компетентности преподавателей, так и при организации процесса обучения. В первую очередь они объясняются непрерывным отслеживанием состояния объекта управления (как продукта, так и процесса) и осуществлением своевременных действий по его корректировке.

Кроме того, апробация системы также проводилась на одном из текстильных предприятий г. Иваново. В первую очередь, был проведен анализ предметной области, в которой работает организация, и совместно с начальником складского хозяйства разработана иерархическая понятийная структура процесса управления складским хозяйством. После этого был осуществлен контроль знаний сотрудников, задействованных в указанном процессе. Полученные результаты позволили определить уровень знаний отдельных сотрудников и состояние процесса в целом. После чего были даны рекомендации по совершенствованию знаний сотрудников, задействованных в указанном процессе, и рекомендации по организации процесса. Оценка проведенных

управленческих воздействий показала, что решения были приняты правильно и оказались эффективны для деятельности предприятия.

Проведенная работа свидетельствует о целесообразности дальнейшего развития и применения концепции управления интеллектуальным развитием организации и инструментального средства ее поддержки. Об этом свидетельствуют результаты, которые были достигнуты в ходе ее использования. В ВУЗе - это:

1. повышение качества подготовки студентов (и как следствие - улучшение их успеваемости);
2. повышение компетентности преподавателей;
3. повышение эффективности организации учебного процесса, как внутри отдельных дисциплин, так и в их взаимосвязи, в рамках учебного плана по специальности.

На предприятии - это:

1. повышение квалификации сотрудников-исполнителей;
2. повышение квалификации сотрудников управленческого звена;
3. повышение эффективности ведения бизнес-процессов.

В качестве перспектив дальнейшего развития предлагаемой системы следует отметить реализацию третьего контура управления.

Список литературы

1. Разработка системы управления интеллектуальным развитием организации: отчет по гранту/ рук. А.А. Белов, исп. А.А. Ражева/ ГОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, Иваново, 2008 г. – 92 с.
2. Белов, А.А. Метод иерархических понятийных структур для оценки знаний (интеллекта) / А.А. Белов, М.А. Шашенкова // Свидетельство о регистрации интеллектуального продукта от 21.04.2005 г. №72200500022. – М.: ФГУП ВНИЦ, 2005.

Сонин Д.О., Белов А.А.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИСТЕМНОГО ПОСТРОЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Управление качеством направлено не только на решение задачи контроля и управления свойствами объекта управления, но и на постоянное развитие организации, что обеспечивает ее конкурентоспособность в современных условиях. В настоящее время преимущество

имеют организации, учитывающие современные тенденции в области управления, основанные на международном опыте, быстро реагирующие на изменение внешней среды, приспосабливающиеся к новым условиям. Одной из наиболее сложных задач разработки системы менеджмента качества является создание системы документационного обеспечения. С приходом новых требований, базирующихся на современных международных стандартах, необходима новая методическая основа, учитывающая данные требования к построению документной системы. Это обусловлено тем, что предоставляя общую концепцию и принципы документационного обеспечения управления, данные стандарты не содержат методики реализации изложенных в них подходов. Кроме того, сложившиеся подходы к ДОУ, во-первых, не представляют его в виде подсистемы всей системы управления организации, во-вторых, не представляют ДОУ в виде единой системы взаимосвязанных и взаимозависимых многоаспектных, крупных подсистем. Отсутствие системного подхода при формировании различных научно-теоретических разработок, а также при создании государственных стандартов в сфере управления документами привёл к тому, что в действительности документационное обеспечение в организациях представляет собой совокупность малосвязанных операций над документами, не позволяющих в полной мере удовлетворять истинные потребности организации. Это выражается в следующих фактах:

1. Часто нормативные и организационные документы создаются лишь для соблюдения требуемых формальностей, в то время как они должны строиться, исходя из общих потребностей, целей, функций и ресурсов системы управления и являться организационным и правовым инструментом деятельности соответствующих сотрудников.

2. Многие процессы ДОУ не только не рассматриваются в совокупности, но и реализуются отдельно друг от друга, в то время как в целесообразной системе продукты одного процесса должны с максимальной эффективностью служить ресурсами для другого. Накопление и хранение документов должно осуществляться с целью формирования источников информации об опыте организации, на основе которого могут обоснованно приниматься управленческие решения в рамках текущей и будущей деятельности организации.

3. На сегодняшний день в большинстве организаций нет централизованного управления документами. Отсутствует единая система индексирования и регистрации входящих документов, единая система хранения документов, что также влечёт за собой неэффективность и недостаточную ценность сохраняемых информационных ресурсов; нет единой системы поиска нужной документации.

4. В большинстве организаций ДОУ не является средством формирования их интеллектуального капитала – запаса информационных ресурсов, что на сегодняшний день является определяющим стратегическим аспектом.

Документная система, представляющая собой информационную систему, обеспечивающую сбор документов, управление документами и доступ к ним в течение времени, направлена на организацию и поддержание документационного обеспечения управленческих процессов. Таким образом, можно говорить о документной системе S_D как о неотъемлемом элементе системы ДООУ, являющим собой подсистему $S_{ДООУ}$ и, следовательно, подсистему самой системы управления S_Y . Её специфика и функциональная структура должны определяться спецификой вышестоящих систем, на поддержание функционирования которых она и должна быть направлена. Только тогда S_D будет считаться открытой и целесообразной.

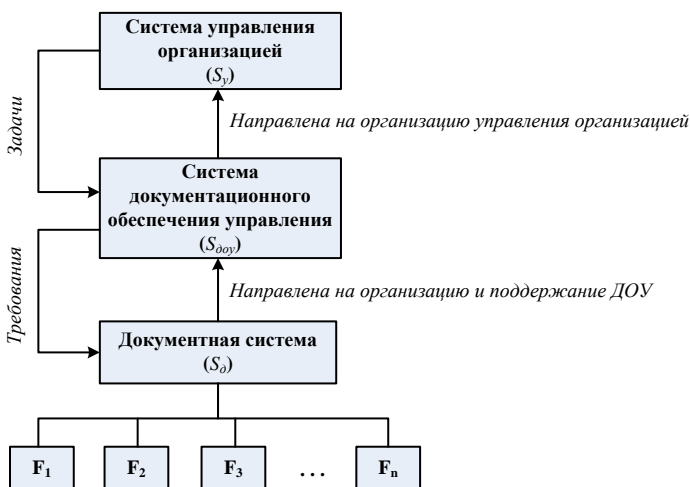


Рис. 1. Концепция управления организацией через документы

В ходе функционирования организации возникает необходимость создания, получения и использования документов, что представляет собой *потребность системы управления* U_{S_Y} , возникающую в процессе принятия решений. Такие документы содержат информацию, являющуюся ценным *ресурсом* R_{S_Y} и важным элементом управлен-

ческой деятельности. Для поддержания непрерывности ведения такой деятельности, обеспечения доказательства тех или иных действий и необходимой подотчётности организации (*задачи $S_{доп}$*) необходимо сохранять все создаваемые и получаемые документы, грамотно управлять ими, а также защищать целостность этих документов в течение требуемого времени. С этой целью в рамках документационного обеспечения управления и создаются документные системы, которые должны представлять собой источник информации о деловой деятельности организации, позволяющий поддерживать её последующую деятельность и управленческие решения на всех уровнях управления.

Управление в организации представляет собой процесс циркуляции управляющих воздействий субъектов управления и информации обратной связи объектов управления, которые представляют собой информационные потоки. Также за счёт информационных потоков происходит взаимодействие организации со средой на всех её уровнях. Вся эта циркулирующая информация нуждается в её фиксации, обработке, хранении с целью поддержки непрерывности управленческого процесса, накопления интеллектуального капитала и корпоративной памяти организации. Для этого и создаётся документная система.

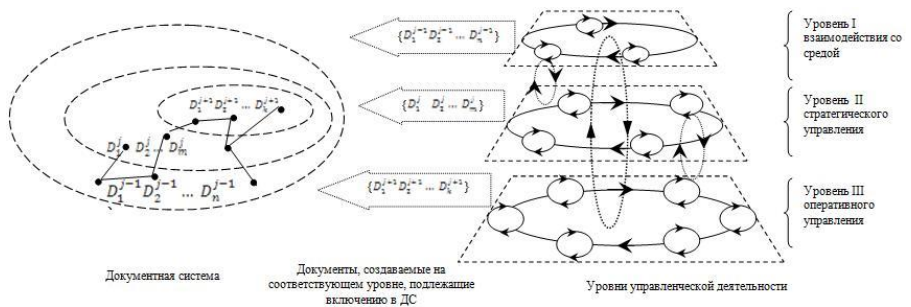


Рис. 2. Единство документной системы на всех уровнях организационной иерархии

Все действующие на сегодняшний день организации являются открытыми системами, т.е. они не могут функционировать в отрыве от среды: своих поставщиков, потребителей и других заинтересованных сторон. В системном анализе существует схема функционирования открытой системы:

$$F^{j-1} \rightarrow U^{j-1} \rightarrow W^{j-1} \rightarrow Z^j \rightarrow F^j \rightarrow S^j$$

$$\uparrow$$

$$\Delta R^j$$

F^{j-1} – функционирование среды;

U^{j-1} – возникающие потребности среды;

W^{j-1} – проблемы среды, т.е. конкретизация потребностей, их описание;

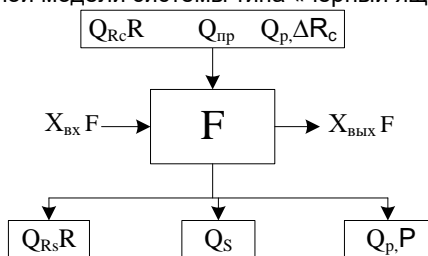
Z^j – цели системы, ориентированные на удовлетворение потребностей среды;

F^j – функции системы;

S^j – системы и ее средства;

ΔR^j – дополнительные ресурсы для реализации процесса функционирования среды.

Представленная цепочка не заканчивается на j -ом уровне, она также может быть разложена в следующую цепь, в которой будет детализирован и конкретизирован каждый элемент. Новая цепочка будет располагаться параллельно рассмотренной, т.е. также иметь также горизонтальное положение. При разработке методики построения документной системы необходимо развернуть используемую в системном анализе горизонтальную схему представления системы в вертикальное положение и проследить взаимосвязь всех атрибутов системы, на каждом из уровней ее детализации. Таким образом, следует детализировать все вышеперечисленные в схеме открытой системы атрибуты в соответствии с протекающими в организации процессами, в результате чего получаем взаимосвязанную систему процессов организации. На основе полученной схемы можно проследить полную декомпозицию функций всех процессов организации на каждом из уровней. Чтобы обозначить документы, которые необходимо включить в документную систему, следует провести детализацию функций на основе ресурсно-продуктивных связей, т.е. проследить все входы и выходы каждой функции, каждого процесса. Такой анализ функций проводится на основе функциональной модели модели системы типа «черный ящик»:



$Q_{Rc}R$, Q_{np} , $Q_p, \Delta R_c$ – требования к ресурсам, процессу и ожидаемому результату, соответственно. Эти данные закрепляются документом системы менеджмента качества, который описывает или задает требования к функции (F).

$Q_{Rs}R$, Q_s , Q_p, P – элементы, отражающие состояние системы.

$Q_{Rs}R$ – отчет об использовании ресурсов;

Q_s – состояние системы после реализации функции F;

Q_p, P – отчет о получившемся результате P.

Данный подход способствует:

- представлению процессов в виде документированных процедур, в результате чего процессы приобретают формализованное представление;
- обозначению всех входов и выходов каждого процесса;
- установлению взаимосвязей между документами, их создателями и контекстом создания документов (отраженными в них процессами) и другими документами;
- выбору подходящей структуры документов, наилучшим образом соответствующей каждой функции, виду деловой деятельности или операции.
- представлению всей организации как системы взаимодействующих динамических процессов;
- распределению ответственности;
- координации всех аспектов деятельности организации.

Представление процессов на основе ресурсно-продуктивных связей способствует описанию документационного обеспечения этих процессов. Таким образом, можно проследить документирование каждого процесса, протекающего в организации. После того, как рассмотрены все процессы организации и построена их функционально-алгоритмическая модель, можно непосредственно приступить к разработке структуры документной системы и определить перечень документов, входящих в ее состав, а также произвести классификацию выделенных документов.

Для достижения системности документационной деятельности существенная роль отводится именно классификации, которая предопределяет последующие процедуры – идентификации и формирование метаданных. Кроме того, классификация позволяет установить

взаимосвязь между функциями управления и документами, а также между процессами и документами, обеспечивающими данные процессы. Разработка классификатора основывается на иерархической проблемной декомпозиции, позволяющей увязать классификацию управленческой деятельности (системно-процессный подход к управлению) со многими процессами по управлению документами. В соответствии с этим принципом разработан новый подход к проведению классификации в документной системе. Классификация основывается на структуризации проблемного пространства с учетом иерархической составляющей. Сформированная классификация не является статической и может постоянно адаптироваться к внутренним и внешним условиям и совершенствоваться, а, следовательно, быть использована в сложных развивающихся системах.

Немаловажным моментом является использование современных компьютерных технологий и электронных средств организации документационного обеспечения. Поскольку разрабатываемая методика направлена на формализацию всех аспектов деятельности системы управления и документационного обеспечения, то возникают предпосылки для перехода на электронные средства. Теоретическая база дает возможность формализации документационных потоков с использованием метода структурного анализа, теории графов и последующей автоматизации их анализа. Это позволяет при использовании сетевых информационных технологий ДОО осуществить оперативную оптимизацию документооборота в корпоративных системах. В настоящее время рассматриваются функциональные возможности использования подсистемы 1С «Управление Делами».

Как говорилось вначале, документационное обеспечение управления одной из своих целей ставит развитие организации через постоянный мониторинг потребностей управления и соответствующую адаптацию документационного обеспечения для удовлетворения данных потребностей. В связи с этим необходимо оценивать эффективность как системы управления, так и системы ДОО. Данное требование реализуется посредством использования методики экономического обоснования, разработанной на кафедре ИТ.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Сформированы системные основы документационного обеспечения управления, разработаны методические основы системного построения документационного обеспечения управления качеством, а также структура и состав основных документов, используемых в процессе управления качеством. Разработка методики основывается на принципах системного и процессного подходов.
2. Разработан алгоритм проектирования и построения документной системы, проработаны отдельные его этапы. Представленный алгоритм позволит обеспечить целостность при построении документационного обеспечения и может являться основой для разработки методики по-

строения документных систем в любых организациях, занятых в различных сферах деятельности.

Результаты работы могут быть использованы в следующих областях:

- В производстве для построения системы документационного обеспечения управления качеством;
- В управлении учебным процессом кафедры, вуза;
- В учебном процессе кафедры в качестве теоретического материала по дисциплине «Организация и технология документационного обеспечения управления».

Е.П. Филатов, А. М. Карякин

Разработка методики и инструментария формирования и принятия управленческих решений, основанных на многокритериальном подходе

По данным Федеральной службы государственной статистики, в период с 2008 по 2011 годы число малых промышленных предприятий сократилось на 34,7 %. Существование экономики Ивановской области и ее дальнейшее совершенствование невозможно без развития малых промышленных предприятий. Об этом свидетельствует опыт ведущих стран мира, в которых данный вид деятельности, развивавшийся десятилетиями, создает до 60 % внутреннего валового продукта, а также до 70 % рабочих мест и до 30 % прямого экспорта.

После вступления РФ в ВТО, целые виды отечественной промышленности попадают под угрозу. Поэтому еще одним аспектом, указывающим на важность развития малых предприятий, является необходимость создания организаций, способных отвечать требованиям современной рыночной экономики. То есть, легкость организации малой предпринимательской деятельности позволяет выйти на рынок большому количеству организаций. В условиях конкурентной борьбы выживают сильнейшие фирмы. Именно эти эффективные, рентабельные, обладающие сильными конкурентными преимуществами предприятия должны развиваться, перерастая из малых в средние и крупные организации, формируя здоровую рыночную экономическую среду.

Анализируя причины закрытия малых предприятий, можно констатировать, что основной причиной является отсутствие стратегического планирования на предприятии, из которой «вытекает» целый ряд следствий, приводящих предприятия к краху:

- рост предприятия, без должного контроля (то есть: дефицит средств, отсутствие опыта, необходимого для развития и т.д.);
- необдуманные решения (метания от либеральной к излишне агрессивной политике);

– непонимание своего места в конкурентной среде (попытки конкурировать с лидерами – «гигантами» рынка, отсутствие виденья бизнеса и др.).

Учитывая, что стратегический план является главным управленческим решением, позволяющим решить все вышеописанные проблемы, стоит констатировать высокую значимость разработок в области стратегического планирования на малых промышленных предприятиях с теоретических и практических позиций, которые позволят повысить эффективность управленческих решений, принимаемых на малых предприятиях, улучшить существующие методики разработки стратегии, а также сформировать «катализатор» для развития малых предприятий и, как следствие, сформировать «здоровую», конкурентоспособную экономическую среду.

Проанализировав существующие инструменты и методики стратегического планирования, был сделан вывод о невозможности их применения к малым промышленным предприятиям (далее МПП). Если рассматривать МПП как объект стратегического планирования, то можно выделить следующие специфики в непосредственном процессе планирования [1].

Требуется использование методов экспресс оценки конкурентного положения организации в связи с быстроизменяющимся конкурентным положением предприятия.

Высокая чувствительность к различным факторам диктует условие анализа всей совокупности факторов для выявления явных и неявных причинно-следственных связей.

Учитывая вышеописанную специфику, автором был разработан алгоритм стратегического планирования (рис. 1). На рисунке видно, что помимо «стандартных» этапов планирования (сбор и анализ информации, формирование цели, а также выбор стратегии), алгоритм дополнен этапом экспресс анализа. Данный элемент играет очень большую роль, поскольку в случае, если нет у предприятия перспектив развития на данном рынке, то необходимо миновать последующие этапы планирования. В противном случае предприятие потеряет много времени и «сил» на проведение планирования, которое в итоге даст результат – отсутствия перспектив.

В качестве инструмента экспресс анализа конкурентного положения предприятия, была разработана графоаналитическая модель, которая позволила наглядно отобразить текущее конкурентное положение предприятия (рис. 2).



Рис. 1. Алгоритм стратегического планирования на МПП

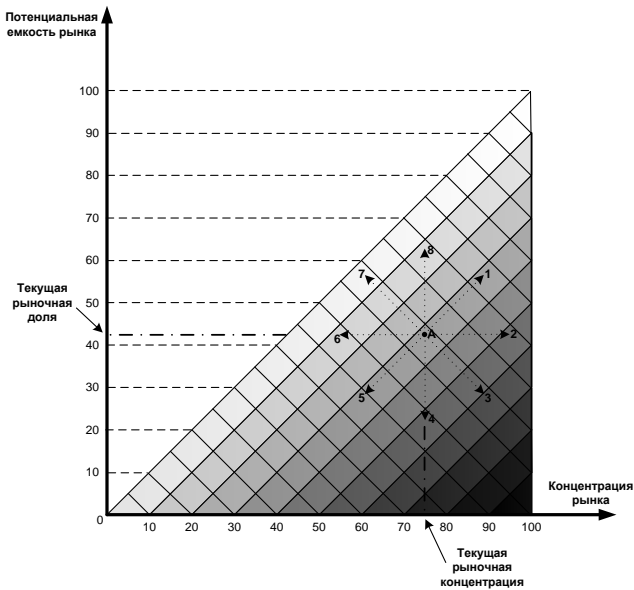


Рис. 2. Графоаналитический инструмент

В данный инструмент заложены 2 основных показателя: рыночная концентрация и рыночная доля предприятия. Под концентрацией понимается отношение совокупного объема производства предприятий, исследуемого вида деятельности, к рыночной емкости. В свою очередь рыночная доля представляет собой отношение объема производства исследуемого предприятия к рыночной емкости. Вычислив данные показатели, мы получим координаты точки на графике, характеризующей конкурентное положение предприятия. В идеальных условиях (когда изменяется только один показатель при этом остальные постоянны) можно с легкостью трактовать как тот или иной экономический процесс (табл. 1).

Таблица 1. Трактовка изменения рыночной ситуации

Номер вектора на рис. 2	Изменение ситуации	Трактовка рыночных изменений
1	Увеличение рыночной доли (емкость постоянна, концентрация увеличивается пропорционально)	Наращивание оборотов, то есть предприятие расширяется и занимает новые свободные рыночные ниши (ниша – есть часть целевого рынка)
2	Снижение рыночной доли (емкость постоянна, концентрация снижается пропорционально)	Ситуация обратная первой – предприятие теряет рыночные ниши, то есть сокращает обороты
3	Рыночная доля увеличивается, концентрация снижается	Сокращение преимуществ прямых конкурентов (рассматриваемая фирма подавляет конкурентов)
4	Рыночная доля сокращается, концентрация увеличивается	Наращивание преимуществ прямых конкурентов (они подавляют рассматриваемую фирму)
5	Рыночная доля остается неизменной, концентрация снижается	Уход с рынка рынок косвенных конкурентов
6	Рыночная доля остается неизменной, концентрация снижается	Приход на рынок косвенных конкурентов
7	Рыночная доля растет, концентрация остается без изменений	Поглощение, то есть мы скупаем активы конкурирующих предприятий
8	Рыночная доля снижается, концентрация остается без изменений	Продажа, то есть конкурирующее предприятие скупает активы рассматриваемого предприятия

Таким образом, посредством применения графоаналитического инструмента становится возможным не только определить текущее конкурентное положение, но и следить за его динамикой, то есть контролировать исполнение стратегии и, в случае необходимости, инструмент может послужить индикатором для начала нового процесса стратегического планирования.

Если говорить об остальных этапах стратегического планирования, то, изучив существующие инструменты выбора стратегии, можно констатировать, что всем им присущ один недостаток: использование небольшого количества показателей для анализа положения предприятия. Это приводит к тому, что стратегия носит рекомендательный характер. То есть они не исследуют причин возможно низких результатов деятельности предприятия, и, как следствие, не предлагают путей для выхода из сложившейся ситуации. Отсюда вытекает необходимость построения матрицы стратегических решений, основанной на многокритериальном подходе. Для того чтобы стало возможным использовать оценки различных показателей в одной системе, необходимо взять в качестве основы для построения матрицы классификацию факторов среды предприятия.

В настоящее время широкое распространение получили две классификации: первая – деление факторов на внутреннее и внешнее окружение; вторая – деление на управляемые и неуправляемые факторы. Они занимают достойное место в науке и практике маркетологов и менеджеров, но имеют свои недостатки: первая классификация не отражает полноту взаимосвязи предприятия и факторов (не характеризуется возможностью и сила влияния предприятия на фактор); вторая классификация исключила недостаток первой, но приобрела новый, в виде жесткой категоричности, то есть деление факторов на «два лагеря» вызывает некоторые сложности ввиду неоднозначности действия некоторых факторов по отношению к предприятию. Поэтому автором была предложена следующая классификация: группировка факторов на три категории, в зависимости от степени влияния на них предприятия (рис. 3). Первая категория – управляемые факторы, то есть те факторы, на которые предприятие может оказать воздействие и получить адекватный, пропорциональный воздействию результат. Вторая категория – неуправляемые – сюда следует относить факторы, не подвластные прямому влиянию предприятия. И третья категория – адаптивные факторы, сюда относятся факторы, состоянием которых нельзя четко управлять, но на них можно оказывать влияние, при этом пропорциональная зависимость между затратами на воздействие и результатом, отсутствует [2].

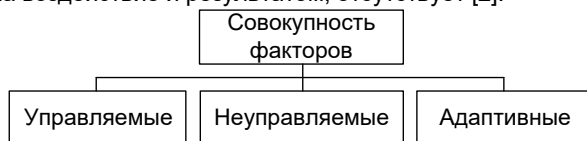


Рис. 3. Классификация факторов

Данная классификация позволяет учесть специфику предприятия, а также степень взаимного влияния организации на факторы. Это является положительным аспектом, поскольку каждое предприятие имеет разные «возможности» и «слабые места», поэтому нельзя выделять «жесткую» классификацию факторов. Рассмотренная классификация, легла в основу матрицы стратегических решений (рис. 4, 5).

Анализ совокупности факторов, предлагается осуществлять посредством метода экспертных оценок [3]. В качестве экспертов выступают сотрудники предприятия, на котором проводится исследование. Результатом анализа являются средневзвешенные оценки в интервале от 1 до 4 для каждой группы факторов. Для неуправляемой группы факторов значения от 1 до 2,5 означает «негативное влияние» данной группы факторов на предприятие, значения выше 2,5 до 4 – «благоприятное влияние». Значения для групп адаптивных и управляемых факторов, следует разделять на три группы влияния: минимум (от 1 до 2), норма (выше 2 до 3), максимум (выше 3 до 4). Значимость группы управляемых факторов, в сравнении с адаптивными, должна быть выше. Поскольку при воздействии на управляемую группу факторов «отдача» будет большей, чем у других групп факторов. Следовательно, для получения максимальной выгоды необходимо в первую очередь обращать внимание на управляемую группу факторов [4].

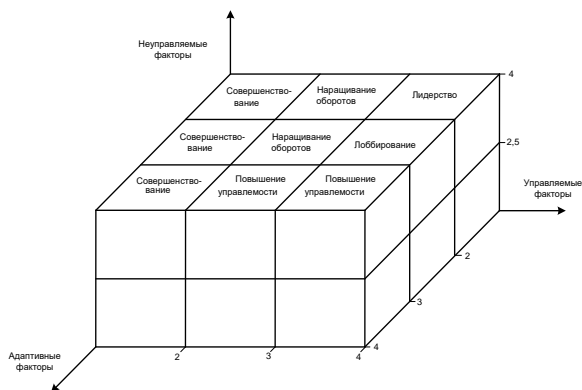


Рис. 4. Трехмерная матрица стратегических решений (первый уровень)

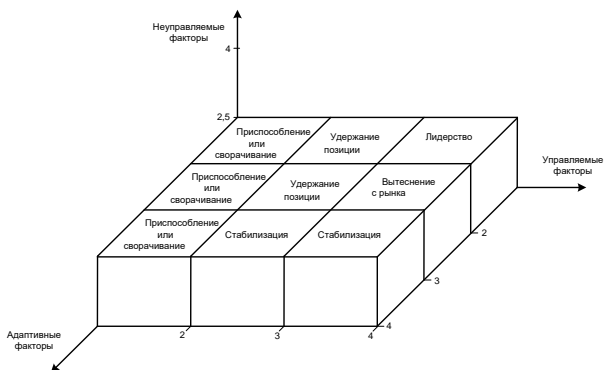


Рис. 5. Трехмерная матрица стратегических решений (второй уровень)

Для применения приведенной выше матрицы, необходимо руководствоваться следующей последовательностью действий. После оценки групп факторов при равных значениях показателей для групп управляемых и адаптивных факторов, приоритетными будут являться стратегические решения, направленные на воздействие на управляемые факторы. В случае, если показатели не равны друг другу, применяется стратегия для повышения наименьшего показателя. Приведем пару примеров: Пример №1. После проведения оценки групп факторов были получены следующие показатели: не управляемые = 2; управляемые = 1,5; адаптивные 1,5. Так как управляемая группа имеет более высокий приоритет в сравнении с адаптивной, то в данном случае будет выбрана стратегия «приспособление или сворачивание». Пример №2. Не управляемые = 3; управляемые = 3,5; адаптивные 2,5. В данном случае будет выбрана стратегия «лоббирование».

Малые промышленные предприятия являются очень перспективным сегментом экономики, который обладает, в сравнении со средними и крупными организациями, большим количеством как преимуществ, так и недостатков. Инструменты, разработанные автором, направлены на снижение главной из причин закрытия малых предприятий – отсутствие стратегического плана, и как следствие, должны способствовать принятию эффективных управленческих решений.

Список литературы

1. **Филатов Е.П.** Малые промышленные предприятия, как объект стратегического планирования: межвуз. сб. науч. тр. «Социально-экономические и гуманитарные проблемы развития России». – Иваново, 2011. – С. 183–186.
2. **Филатов Е.П.** Анализ классификаций факторов, влияющих на деятельность предприятия // Экономика и управление: тез. науч.-техн. конф. – Иваново, 2011. – С. 33–35.
3. **Основы** экономического и социального прогнозирования / под ред. В.И. Мосина, Д.К. Круга. – М.: Высш. шк., 1985. – 200 с.
4. **Филатов Е.П.** Разработка матрицы стратегических решений, основанной на многокритериальном подходе // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1.

Ю.В. Грубова, А. М. Карякин

Управления требованиями заинтересованных сторон в системе менеджмента качества вуза

Применение инструментов менеджмента качества в сфере образования с каждым годом приобретает все большую актуальность. Специфика вуза заключается в многообразии заинтересованных сторон (ЗС), имеющих различия в своих требованиях. Качество образовательной деятельности современного вуза должно не просто соответствовать требованиям ФГОС ВПО, гармоничное развитие и совершенство-

вание СМК вуза возможно только при соблюдении ключевого принципа менеджмента качества – ориентации на удовлетворение потребностей и ожиданий заинтересованных сторон.

Аналитическую базу исследования составили материалы вузов Ивановской области и г. Иваново. По количеству студентов Ивановская область находится в числе пяти самых «студенческих» регионов Центрального федерального округа Российской Федерации. В настоящее время в Ивановской области функционируют 8 государственных образовательных учреждений ВПО, 4 филиала государственных вузов России, а также 5 негосударственных вузов, включая филиалы. Наиболее важная роль в системе ВПО Ивановской области принадлежит государственному вузам, на долю которых приходится около 95 % студентов, и именно они проявляют наиболее высокую активность в применении моделей менеджмента качества в своей деятельности. Из табл. 1 видно, что разным аспектам управления их требованиями не уделяется достаточного внимания, и вузы, как правило, ограничиваются проведением опросов потребителей и обработкой полученных результатов без глубокого анализа содержащихся в них противоречий и согласования разнообразных требований.

Среди многообразия ЗС можно выделить две наиболее значимые группы, непосредственно связанные с образовательной деятельностью, оказывающие на нее наиболее сильное влияние, выражающие свои основные требования в виде компетенций, которые мы предлагаем назвать активными группами заинтересованных сторон (АГ ЗС) вуза: во-первых, индивидуальные потребители образовательных услуг – студенты, аспиранты и слушатели, интересы которых пересекаются с абитуриентами (потенциальными потребителями), родителями и другими лицами, влияющими на их мотивацию и принятие решений; во-вторых, участники рынка труда – работодатели, принимающие на работу выпускников вуза, а также направляющие на обучение своих сотрудников.

Ранее нами были предложены инструменты, позволяющие более глубоко изучить аспекты взаимодействия вуза с заинтересованными сторонами:

– предложена авторская классификация заинтересованных сторон образовательного учреждения ВПО, раскрывающая их многообразие через цели сотрудничества с вузом, основные интересы, требования и влияние на деятельность вуза, что обуславливает целесообразность введения в научный оборот понятия «активные группы заинтересованных сторон вуза», под которыми понимаются наиболее значимые заинтересованные стороны, непосредственно связанные с его образовательной деятельностью и выражающие свои основные требования в виде компетенций;

Таблица 1. Опыт работы с заинтересованными сторонами в вузах Ивановской области

Вуз	Наличие сертифицированной СМК	Модель построения СМК	Наличие ответственного подразделения	Направления работы вуза с ЗС				Деятельность вуза по работе с ЗС			
				Проводит идентификацию ЗС	Регулярно выявляет требования ЗС	Регулярно оценивает влияние ЗС на деятельность вуза	Регулярно оценивает удовлетворенность ЗС	Проводит опросы сотрудников	Проводит опросы студентов	Проводит опросы работодателей	Проводит опросы других ЗС
ИвГУ	Есть	ИСО	Есть	Да	*	*	Да	Да	Да	Да	*
ИГЭУ	Есть	EFQM	Есть	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
ИГХТУ	Есть	ИСО	Есть	Да	*	*	*	Да	Да	Да	Нет
ИГАСУ	Нет	*	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	*	*	*	Нет
ИГТА	Нет	*	Есть	Да	*	*	Нет	Да	Да	*	Нет
ИГСХА	Нет	*	Есть	*	Нет	Нет	Нет	*	*	*	Нет
ИГМА	Нет	*	Есть	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да
ШГПУ	Есть	ИСО	Есть	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Да	*	Нет

– дано авторское определение понятия «управление требованиями активных групп заинтересованных сторон вуза», которое предлагается рассматривать как непрерывный целенаправленный процесс выявления, упорядочения, согласования и принятия решений по следованию вуза за их изменениями путем адаптации образовательной деятельности в целях повышения степени удовлетворения этих требований, что позволило уточнить понятие «качество образовательной деятельности вуза», в основе которого лежит управление требованиями активных групп заинтересованных сторон вуза к компетенциям;

– разработана масштабируемая модель управления требованиями активных групп заинтересованных сторон как одного из управленческих процессов в СМК вуза, ориентированная на повышение качества образовательной деятельности на основе концепции непрерывного совершенствования за счет удовлетворения разнонаправленных требований к компетенциям;

– предложена трехуровневая сетевая модель компетенций обучающихся, отражающая результаты исследования, детализации и систематизации требований активных групп заинтересованных сторон вуза к компетенциям, формируемым в ходе реализации образовательного процесса, являющаяся инструментом управления требованиями активных групп заинтересованных сторон в СМК вуза;

– разработана методика обоснования приоритетов требований активных групп заинтересованных сторон вуза, позволяющая оценивать востребованность различных компетенций и неудовлетворенность качеством их формирования, включающая алгоритм упорядочения этих требований и ориентированная на повышение качества образовательной деятельности.

Мы предлагаем следующую последовательность развертывания модели управления требованиями активных групп заинтересованных сторон в СМК вуза на уровне выпускающей кафедры (рис. 1). Отметим, что некоторые этапы могут осуществляться как последовательно, так и параллельно друг с другом.

В продолжение исследования нами были разработаны методические рекомендации по применению модели, которые позволят обеспечить снижение инерционности процесса обучения, сокращение цикла обратной связи, а также позволяют отслеживать динамику требований активных групп заинтересованных сторон к качеству образовательной деятельности и содержанию образовательных программ.



Рис. 1. Последовательность развертывания модели управления требованиями активных групп заинтересованных сторон вуза

Сборник трудов ведущих ученых ИГЭУ за первый семестр 2018-19
учебного года

Подписано в печать 2.10.2018 г. Формат 60×84 ¹/₁₆. Печать плоская.
Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 50 экз. Заказ .

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет
им. В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ