

05.13.01

П58

На правах рукописи



**Попова Ольга Валерьевна**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИХ  
АККУМУЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление  
и обработка информации (промышленность)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2007

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Казаринов Лев Сергеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Устогов Михаил Николаевич;  
кандидат технических наук  
Вуколова Алина Ивановна.

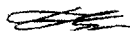
Ведущая организация – Самарский государственный технический  
университет, г. Самара

Защита состоится «28» февраля 2007 г. на заседании  
диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном  
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,  
ауд.1001/главный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского  
государственного университета.

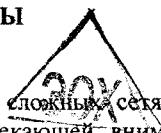
Автореферат разослан «26» января 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



А.М. Коровин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



### Актуальность темы

Системный анализ потоков энергетических ресурсов в сложных сетях на основе моделирования является постоянной темой, привлекающей внимание широкого круга исследователей вследствие многочисленных практических приложений. В указанном направлении решены разнообразные задачи, позволяющие осуществлять расчеты потоков в сетях с различными характеристиками. Здесь следует отметить как классические задачи, решаемые при моделировании сложных систем, так и специальные методы, используемые при исследовании потокораспределений в сложных инженерных сетях.

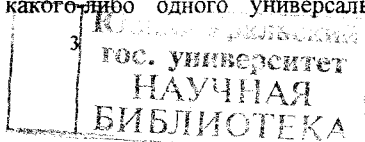
Особое значение имеет задача анализа потоков в сложных сетях энергетических комплексов производственных систем, в частности, в металлургической промышленности. Энергетические потоки здесь тесно связаны по динамике взаимодействия с технологическими процессами и существенно определяют их энергетическую эффективность. Поэтому возникает задача системного рассмотрения энергетических потоков в металлургическом производстве в едином комплексе с технологическими процессами.

Для металлургического производства рассматриваемая задача является особо актуальной в связи с необходимостью проведения энергосберегающих мероприятий. Металлургическое производство является весьма энергоемким и энергетическая составляющая издержек существенно определяет себестоимость продукции. В этих условиях важное значение имеет управление энергетическими потоками и процессами энергосбережения на металлургических предприятиях.

Исследования данного вопроса содержатся в работах член-корреспондента АЭН РФ, д.т.н. Никифорова Г.В., к.т.н., проф. Олейникова В.К., цикл работ указанных авторов в сфере энергосбережения и управления энергопотреблением в металлургическом производстве был удостоен в 2003 году премии Правительства РФ в области науки и техники. Существенный вклад в развитие работ по данному направлению внесли Ахметзянов А.В., Баясанов Д.Б., Бутковский А.Г., Вапник В.Н., Дубровский В.В., Дюран Б., Евдокимов А.Г., Зингер Н.М., Казаринов Л.С., Крянев А.В., Кудрин А.В., Мелентьев В.А., Меренков А.П., Морозов В.А., Рапопорт Э.Я., Руденко Ю.Н., Сеннова Е.В., Сидлер В.Г., Скальский В.Л., Стратан Ф.И., Тевяшев А.Д., Хасилев В.Я. и другие.

Для решения задачи повышения эффективности технологических процессов существенное значение имеет учет динамики аккумуляирования энергоресурсов в сетях и системах. Учет аккумуляирования энергоресурсов непосредственно определяет резервы дополнительного повышения выработки продукции и, следовательно, повышения эффективности производства. Однако решение данной задачи в сложных производственных комплексах приводит к необходимости анализа динамики процессов в сложных сетях, объединяющих в единую систему разнообразные технологические узлы и подсистемы.

Существующие подходы к расчету подобных сложных систем, как правило, базируются на использовании какого-либо одного универсального метода



(например, метода узловых напоров, метода контурных потоков и др.). Подобная унификация не всегда эффективна и может обусловить использование нефизичных моделей элементов сети (например, к использованию обратных динамических операторов), которые приводят к некорректной постановке задачи моделирования особенно для систем с вырождением. Системы с вырождением, как правило, возникают в задачах оперативного управления потоками в сетях и отражают процессы активного изменения их параметров и структур. Кроме того, производственные сети обладают сложной динамикой процессов, оперативный расчет которых затруднителен даже при использовании современной вычислительной техники.

Для сетей важной задачей является также идентификация производственных характеристик элементов сетей по данным эксплуатации. Решение указанной задачи нетривиально, т.к. данные эксплуатации отражают лишь внешние характеристики систем, что обуславливает их большой разброс при реализации. Поэтому для практики необходимо знать граничные характеристики, очерчивающие область допустимых значений. Кроме того, данные эксплуатации содержат неполную информацию о характеристиках элементов и параметров режимов сетей, что обуславливает необходимость использовать при решении данной задачи методы регуляризации.

Исходя из сказанного, является актуальной задача анализа потоков энергоресурсов в сложных сетях с учетом динамики аккумуляирования ресурсов и выявлением резервов повышения эффективности технологических процессов на основе идентификации соответствующих производственных характеристик сетей и их элементов по данным эксплуатации.

**Объектом исследования** являются потоки энергетических ресурсов в производственных сетях, включая автоматизированные системы оперативного управления потоками ресурсов, а также распределенные системы автоматического регулирования режимов снабжения ресурсами.

**Предметом исследования** являются модели анализа потоков энергетических ресурсов в сложных производственных сетях, методы идентификации производственных характеристик элементов сетей и параметров их режимов, а также решение задач оптимизации на моделях.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности производственных систем на основе анализа потоков энергетических ресурсов в сложных сетях с учетом динамики их аккумуляирования и выявление резервов повышения эффективности производственных систем на основе идентификации производственных характеристик элементов сетей и параметров их режимов по данным эксплуатации.

**Задачи диссертационной работы:**

1. Разработка модели анализа потоков энергетических ресурсов в сложных производственных сетях с учетом динамики их аккумуляирования.

2. Разработка метода идентификации граничных производственных характеристик систем по данным эксплуатации с учетом их реального разброса.

3. Разработать программное обеспечение задачи моделирования потоков энергетических ресурсов в сложных сетях с учетом динамики их аккумулирования, а также задачи идентификации производственных характеристик систем по данным эксплуатации.

4. На основе разработанных методов постановка и решение задачи моделирования и оптимизации технологической системы пароснабжения металлургического предприятия на примере промплощадки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач в диссертационной работе применены методы моделирования сложных сетей и систем, методы идентификации характеристик технологических систем, методы обработки информации в АСУ, а также методы математической статистики и теории динамических систем, методы оптимизации.

Проверка изложенных в работе методов проводилась с использованием компьютерного моделирования и экспериментально.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Предложен новый метод анализа потоков энергетических ресурсов в сложных производственных системах, состоящих из связывающих сетей и подсистем различного функционального типа. Данный метод основан на многослойном подходе к расчету указанных систем и позволяет в автоматизированном режиме, исходя из топологии сетей в соответствии с их законами, оперативно осуществлять анализ потоков энергетических ресурсов с учетом динамики их аккумулирования.

2. Предложен новый алгоритм идентификации граничных производственных характеристик элементов сетей и систем по данным эксплуатации, основанный на кластеризации данных и регуляризации постановки задачи, исходя из априорных данных.

### **Практическая ценность**

1. Разработанный метод анализа потоков энергетических ресурсов в сложных производственных сетях позволяет осуществлять расчеты и оценки резервов ресурсов, образующихся в сетях за счет их аккумулирования, и использовать указанные резервы для повышения эффективности производства.

2. Разработанный метод идентификации производственных характеристик позволяет на основе данных эксплуатации оценивать потенциальные возможности систем и сетей, что создает основу для повышения эффективности их использования.

3. Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет осуществлять постановку и решение задач оптимизации режимов снабжения энергетическими ресурсами сложных технологических процессов.

### **Реализация работы**

Разработанное методическое и программное обеспечение внедрено в практику управления режимами технологической системы пароснабжения промплощадки ОАО «ММК», было использовано для расчета режимов электрических станций ПВЭС, ЦЭС, СТ-3 и позволило решать задачу оптимизации параметров их режимов.

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующим актом. Технологический эффект внедрения на ОАО «ММК» состоит в повышении выработки электрической энергии на 1,1 МВт.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы доложены на III Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии», г. Санкт-Петербург, 30 июня-2 июля 2005 г.; VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России», г. Магнитогорск, 24-26 мая 2005 г.; XXVI Российской школе по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 27-29 июня 2006 г.; X Всероссийском научно-практическом семинаре «Информатизация и системы управления в органах исполнительной власти», г. Челябинск, 18-19 октября 2006 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 работ.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Модели и метод анализа потоков энергетических ресурсов в сложных производственных сетях с учетом динамики их аккумулярования.
2. Метод и алгоритм идентификации производственных характеристик технологических систем и сетей на основе данных эксплуатации.
3. Постановка и решение задачи моделирования и оптимизации режимов снабжения энергетическими ресурсами сложных технологических процессов пароснабжения на примере металлургического производства.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Проблемы управления потоками энергетических ресурсов в сложных производственных сетях**

Сложные производственные комплексы, в частности, металлургическое производство представляют собой сложные структуры, состоящие из технологических цехов, подключенных к сетям энергетических ресурсов. В качестве энергетических ресурсов выступают природный газ, электрическая и тепловая энергия, пар на технологические нужды и др. Для масштабных производств распределение энергетических ресурсов осуществляется с помощью соответствующих сетей сложной конфигурации. Достаточно сказать, что для такого крупного металлургического комбината, как ОАО «ММК», число абонентов сетей превышает тысячу, а сами сети распределены на большой территории – десятки километров.

В качестве примера на рис. 1 приведена структурная схема распределенной системы автоматического управления (САУ) пароснабжения сетевого района кислородно-конверторного цеха (ККЦ) и коксохимического производства (КХП) промплощадки ОАО «ММК». Схема включает в себя три электрические станции (ПВЭС-2, ЦЭС, СТ-3), котельную, листопрокатные цеха (ЛПЦ-3, 6-8, 10), вакууматор доменного производства и связывающие их технологические паровые сети. Весь технологический комплекс управляется распределенной САУ пароснабжения, состоящей из трех систем управления (СУ) электрическими станциями, СУ паросилового цеха (ПСЦ), СУ энергокорпусом (ЭК) и СУ доменного производства.

Особенностью функционирования сетей энергетических ресурсов в производственных комплексах является их тесная связь с технологическими процессами. Например, потребление пара в металлургическом производстве носит крайне неравномерный характер. Ограниченная мощность паровых сетей обуславливает резко выраженную динамику взаимодействия процессов пароснабжения с технологическими процессами. Для стабилизации режимов пароснабжения при неблагоприятных воздействиях со стороны технологических процессов используют пароаккумуляторы и системы автоматического регулирования зарядно/разрядных процессов аккумуляторов, которые демпфируют резкие колебания нагрузки. Ограниченность мощности паровых источников приводит к необходимости выработки таких стратегий управления пароснабжения, которые позволили бы использовать все ресурсы пара теплофикационной системы предприятия для стабилизации режимов пароснабжения и максимального повышения выработки продукции. Строгое решение данной задачи возможно лишь на основе моделирования параметров потоков распределения ресурсов в производственном комплексе с учетом динамики аккумуляирования ресурсов.

В работе приводится обзор методов системного анализа процессов в сложных сетях и методов их моделирования, показывается, что существующие подходы в основном базируются на уравнениях схем замещения функциональных процессов. Использование дифференциальных уравнений схем замещения функциональных процессов для сложных сетей приводит к вычислительным трудностям в связи с большой их размерностью, что снижает оперативность расчетов и не позволяет использовать их в автоматизированных системах диспетчерского управления сетями. На основании этого делается вывод о необходимости разработки специальных методов расчета потоков энергетических ресурсов в сетях, которые позволили бы агрегировано представлять динамические процессы аккумуляирования энергоресурсов.

На основе проведенного анализа и обзора литературы ставятся цель и задачи исследования.

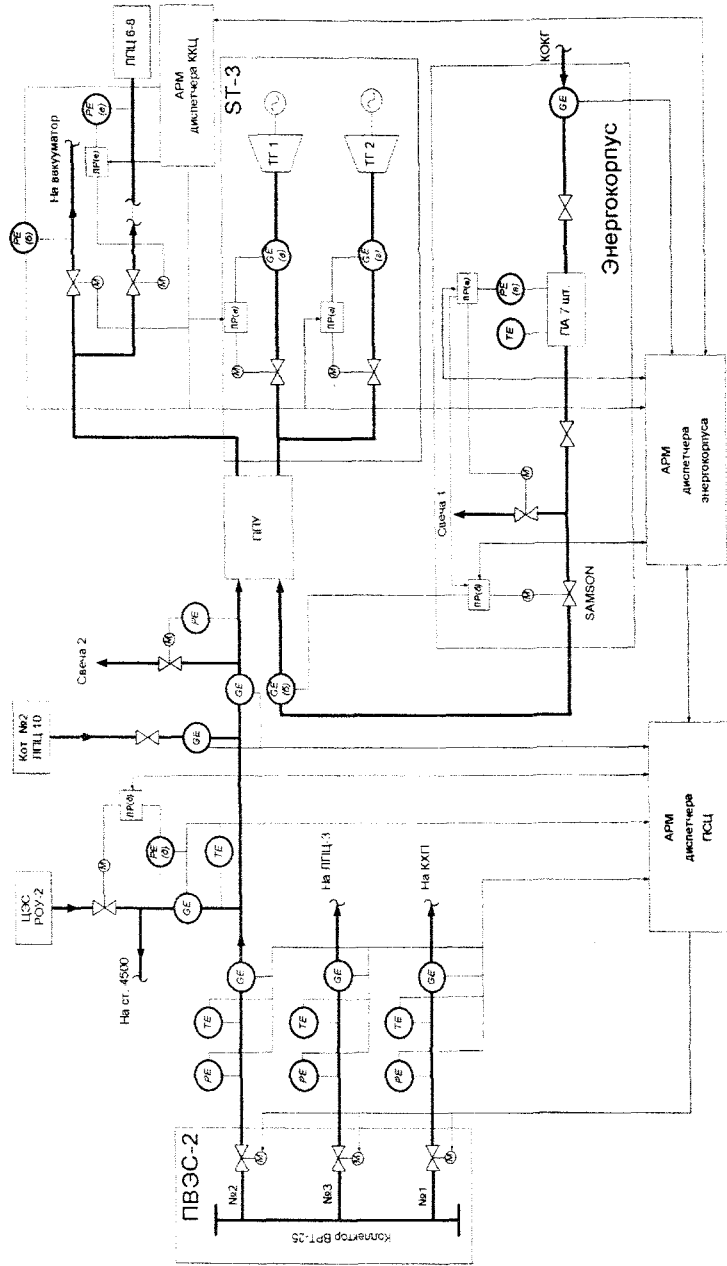


Рис. 1 Структурная схема распределенной системы автоматического управления пароснабжения сетового района ККЦ и КХП



## Методика моделирования потоков энергетических ресурсов в сложных сетях с учетом динамики их аккумулярования

### Основные положения

Сеть снабжения энергетическими ресурсами в общем виде будем математически представлять в виде совокупности узлов и дуг, через которые проходят потоки энергоресурсов

$$\langle \{node_i\}; \{arc_j\} \rangle, \quad (1)$$

где  $node_i$  –  $i$ -ый узел сети;  $arc_j$  –  $j$ -ая дуга сети.

Закон преобразования параметров энергоресурса на  $j$ -ой дуге сети описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных вида

$$\frac{\partial \varphi^j(x_j, t)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 a_{ji}(x_j, t, \varphi^j) \frac{\partial \varphi^i(x_j, t)}{\partial x_j} = f_j(x_j, t, \varphi^j), \quad j \in M, \quad (2)$$

где  $\varphi^j = [\varphi_1^j(x_j, t), \varphi_2^j(x_j, t), \varphi_3^j(x_j, t)]$  – вектор-функция, описывающая состояние параметров ресурса (напор, расход, температура) на  $j$ -ой дуге сети в точке с координатой  $x_j \in (x_{1j}, x_{2j})$  в момент времени  $t$ ;  $x_{1j}, x_{2j}$  – координаты начала и конца  $j$ -ой дуги сети;  $f_j(\cdot)$  – некоторые известные вектор-функции.

Пусть  $\varphi_1^j(x_j, t) = p_j(x_j, t) = p_j$ ,  $\varphi_2^j(x_j, t) = g_j(x_j, t) = g_j$ ,  $\varphi_3^j(x_j, t) = T_j(x_j, t) = T_j$  – функции распределения напора, расхода и температуры на  $j$ -ой дуге сети. Функции  $\varphi_l^j(x_j, t)$ ,  $l = 1, 2, 3$ , обладающие непрерывными первыми производными и удовлетворяющие уравнениям системы (2), являются решениями этой системы уравнений на  $j$ -ой дуге сети.

Для получения модели неустановившегося потокораспределения в сети система уравнений (2) должна быть дополнена системой алгебраических уравнений, определяющей условия согласования параметров потоков энергоресурсов в узлах сети:

$$\psi_l[\varphi(x_{2,k}, t), \varphi(x_{1,q}, t)] = 0, \quad l = 1, 2, 3, \quad k \in V_{2,i}, \quad q \in V_{1,i}, \quad (3)$$

где  $V_{1,i}, V_{2,i}$  – множества индексов дуг, входящих в  $i$ -ый узел и исходящих из него.

Система уравнений (2) совместно с системой (3) является математической моделью неустановившегося потокораспределения в инженерной сети.

Связь параметров сети в общем случае описывается нелинейными динамическими операторами, которые в зависимости от физических свойств дуг могут быть:

– емкостного характера

$$(p_j, T_j)^T = C_j(p_{1j}, g_j, T_{1j}), \quad (4)$$

где  $p_j, g_j, T_j$  – соответственно распределение по  $j$ -ой дуге напоров, расходов, температур;  $p_{1j}, T_{1j}$  – соответственно значения напора и температуры в начальном узле дуги;

– индуктивного характера

$$(g_j, T_j)^T = L_j(p_j, T_{1j}). \quad (5)$$

Установившиеся процессы могут быть описаны нелинейными функциональными характеристиками:

– резистивного характера

$$(p_{2,j}, T_{2,j})^T = R_j(p_{1,j}, g_{1,j}, T_{1,j}), \quad (6)$$

где  $p_{2,j}, T_{2,j}$  – соответственно значения напора и температуры в конечном узле дуги;

– кондуктивного характера

$$(g_{2,j}, T_{2,j})^T = Y_j(p_j, T_{1,j}). \quad (7)$$

Рассмотрим в работе класс сетей, расчет которых можно выполнить с достаточной для практики точностью при следующих предположениях:

1) сеть носит сложный характер, число узлов сети может составлять сотни и тысячи;

2) удельный вес элементов сети, для описания которых необходимо использовать динамические характеристики, значительно меньше веса элементов, для описания которых достаточно использовать нелинейные функциональные характеристики;

3) среди элементов с динамическими характеристиками преобладают элементы емкостного характера.

Подобного класса сеть представляется следующим образом (рис. 3).

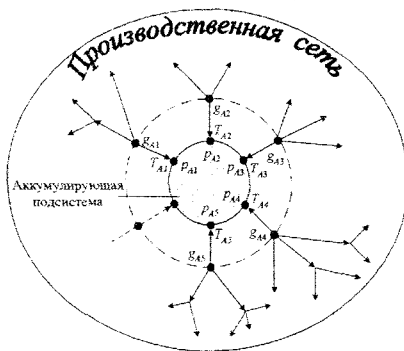


Рис. 3. Схема представления сети

Вся сеть в целом делится на подсистемы, часть из которых описывается нелинейными функциональными характеристиками, а другая часть – динамическими. Будем считать, что динамические подсистемы представляют собой аккумулярирующие подсистемы с динамическими операторами емкостного типа. Название аккумулярирующей подсистемы связано с тем, что подобная подсистема ведет себя как емкость: входящие в нее потоки могут накапливать энергоресурсы. Входами данной подсистемы являются распределение расходов  $g_{Aj}$ , а также

температуры  $T_{1,j}$  и напоры  $p_{1,j}$ , выходами – напоры  $p_{2,j}$  и температуры  $T_{2,j}$  аккумулярирующей подсистемы. Такое представление является физическим. Если в сети имеются элементы другого характера, то их уравнения должны быть приведены к указанным характеристикам, с использованием, например, обратного оператора.

Так как производственные сети, как правило, имеют большую размерность, для преодоления сложности расчета в работе используется многослойная модель сложной сети, представленная на рис. 4.

Центральным ядром расчета сложной сети является расчет деревьев сети, который выполняется с использованием резистивных ветвей деревьев. Расчет деревьев сети высокой размерности может быть выполнен достаточно оперативно и с высокой точностью. Далее к базовому расчету деревьев сети последовательно

подключаются расчеты с участием дополнительных элементов сети: хорд, потребителей, аккумулирующих подсистем и регуляторов систем автоматического регулирования. Подключение указанных дополнительных элементов осуществляется на основе решения нелинейных уравнений связи:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{Ch}(G_{Ch}, T_{Ch}) &= 0; \\ \Delta T_{Ch}(G_{Ch}, T_{Ch}) &= 0; \\ \Delta G_H(G_H^{In}, T_H^{In}) &= 0; \\ \Delta T_H(G_H^{In}, T_H^{In}) &= 0; \\ \Delta P_A(G_A, T_A, P_A^0) &= 0; \\ \Delta T_A(G_A, T_A, P_A^0) &= 0; \\ x(x_0) &= x_0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\Delta P_{Ch} = P_{Ch}^{Ex} - P_{Ch}^c$ ,  $\Delta T_{Ch} = T_{Ch}^{Ex} - T_{Ch}^c$ , разность соответственно напоров и температур, определенных из расчета сети с хордами и деревьев сети;  $\Delta G_H = G_H - G_H^{In}$ ,  $\Delta T_H = T_H - T_H^{In}$  – разность соответственно расходов и температур, определенных из расчета сети с потребителями и исходными условиями для расчета сети с хордами;  $\Delta P_A = P_A^{Ex} - P_A^c$ ,  $\Delta T_A = T_A^{Ex} - T_A^c$  – разность соответственно напоров и температур, определенных из расчета сети с аккумулирующими подсистемами и деревьев сети;  $x_0$  – исходные условия управляющих воздействий;  $x$  – значения управляющего воздействия, полученные в результате расчета сети.

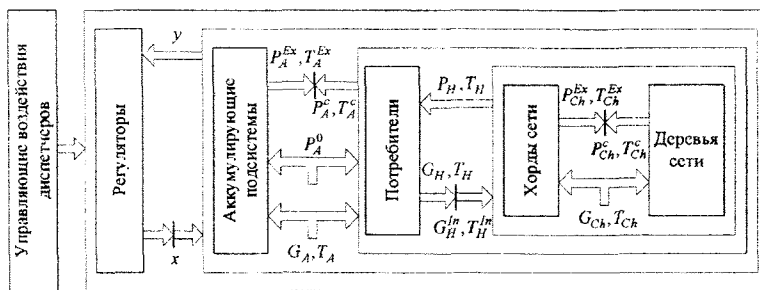


Рис. 4. Структура многослойной модели сложной сети

Таким образом, предложенную модель можно классифицировать как многослойную модель расчета потоков в сетях с учетом динамики их аккумулирования.

#### Вычислительный алгоритм расчета сети

В моделях газовых, водяных и паровых сетей определяемыми параметрами режимов являются напоры, расходы и температуры соответствующих потоков энергоресурсов. В сетях иной природы в качестве базовых параметров режимов могут использоваться иные параметры. С целью упрощения изложения материала

в дальнейшем при описании предлагаемой модели производственной сети будем оперировать режимными параметрами – напорами, расходами и температурами. Данный подход допускает естественное обобщение на иные параметры режимов.

Для связи потоков энергетических ресурсов в узлах сети будем использовать балансовые соотношения, а для нахождения их значений – метод Ньютона. Так как сети имеют большую размерность, алгоритм расчета построен с учетом разреженности матрицы элементов сети. Кроме того, в модели учтена возможность оперативного переключения элементов сети и автоматическое регулирование их пропускной способности. В целом предлагаемая модель отражает не только физические процессы потоков в сетях как объектов управления, но и 2-уровневое представление процессов управления потоками в сетях. На нижнем уровне осуществляются процессы автоматического регулирования, на верхнем уровне – оперативно-диспетчерского управления.

В работе модель сети представляется в виде ориентированного графа с переменной структурой. Для оперативной реконфигурации сети вводится функция переключения  $v$ , которая принимает значения:  $v = 1$  – подключено;  $v = -1$  – подключено в обратном направлении;  $v = 0$  – отключено.

Рассмотрим расчет установившегося процесса с использованием функциональных зависимостей в общем случае – нелинейных.

#### Расчет дерева сети

Узел сети представлен на рис. 5.

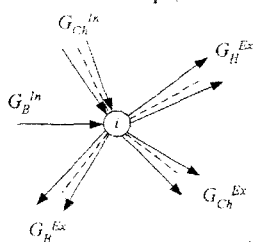


Рис. 5. Узел сети

Здесь  $G_B^{In}$  – поток из ветви дерева, входящей в узел;  $G_{Ch}^{In}$  – потоки из хорд, входящих в узел;  $G_B^{Ex}$  – потоки из ветвей дерева, исходящих из узла;  $G_{Ch}^{Ex}$  – потоки из хорд, исходящих из узла;  $G_H^{Ex}$  – потоки из ветвей, идущих к потребителям.

Расчет потоков через узлы для сети будем определять на основе балансового соотношения

$$g_{B,i} = \sum_{j=1}^{NTEX(i)} g_{B,j} - \sum_{j=1}^{NCIN(i)} g_{Ch,j} + \sum_{j=1}^{NCEX(i)} g_{Ch,j} + \sum_{j=1}^{NLEX(i)} g_{H,j}, \quad (9)$$

где  $i$  – номер узла;  $NTEX(i)$  – число ветвей дерева, исходящих из  $i$ -го узла;  $NCIN(i)$ ,  $NCEX(i)$  – число хорд соответственно, входящих в  $i$ -ый узел и исходящих из него;  $NLEX(i)$  – число потребителей, подключенных к  $i$ -му узлу.

В общем случае необходимо в узле сети учитывать суммирование потоков с разными температурами по соотношению

$$h_i = h_i(p_i, T_i), \quad (10)$$

где  $h_i$  – энтальпия. Тогда энтальпия на выходе  $i$ -го узла

$$h_i^{out} = \sum_{j=1}^{NIN(i)} g_j h_j / \sum_{j=1}^{NIN(i)} g_j, \quad (11)$$

где  $NIN(i)$  – число дуг сети, исходящих из  $i$ -го узла.

Температура на выходе  $i$ -го узла определяется по соотношению

$$T_i^{out} = T_i(h_i^{out}, p_i). \quad (12)$$

Расчет расходов энергоресурса через узлы осуществляется по соотношению (9), начиная с потребителей, расходы которых известны, до источников. Расчет напоров в узлах сети производится обратным движением от источников, напоры которых известны, к потребителям по соотношению

$$p_k - p_i - \Delta p_{ki}, \quad (13)$$

где  $p_k, p_i$  – напоры соответственно в начальном  $i$ -ом и конечном  $k$ -ом узлах ветви;  $\Delta p_{ki}$  – падение напора в ветви, соединяющей  $i$ -ый и  $k$ -ый узлы, которое рассчитывается по формуле, отражающей физические свойства ветвей. Например, для гидродинамических расчетов используется формула

$$\Delta p_{ki} = R_{ki} g_{ki}^2, \quad (14)$$

где  $R_{ki}$  – сопротивление ветви, соединяющей  $i$ -ый и  $k$ -ый узлы;  $g_{ki}$  – поток ресурса в ветви, соединяющей  $i$ -ый и  $k$ -ый узлы.

В общем случае напоры связаны с температурами и расчет производится с использованием нелинейных функциональных зависимостей резистивного характера вида (6).

При расчете сети с хордами в частном случае задаются начальные значения расхода энергоресурса на хордах  $g_{Ch,j}$ . Расчет в этом случае производится при минимизации невязки по напору в конечном узле хорды, который определяется по соотношению

$$p_{Ch,j}^{Ex} = p_{Ch,j}^{In} - g_{Ch,j}^2 R_{Ch,j}, \quad (15)$$

где  $p_{Ch,j}^{In}$  – напор в начале  $j$ -ой хорды, полученный из расчета деревьев сети по (9), (13);  $R_{Ch,j}$  – сопротивление  $j$ -ой хорды.

Невязка по напорам определяется по соотношению

$$E_{Ch}^2 = \sum_{j=1}^{NC} (p_{Ch,j}^{Ex} - p_{Ch,j}^c)^2, \quad (16)$$

где  $NC$  – число хорд;  $p_{Ch,j}^c$  – напор в конце  $j$ -ой хорды, полученный из расчета деревьев сети по (9), (13).

Минимизация невязки осуществляется методом Ньютона.

В общем случае расчет ведется с использованием нелинейной функциональной зависимости резистивного характера вида (6).

Расчет сети с потребителями происходит при минимизации невязки расходов энергоресурсов на нагрузках. Невязка определяется по выражению

$$E_H^2 = \sum_{j=1}^{NLoad} (g_{H,j} - g_{L,j})^2, \quad (17)$$

где  $g_{L,j}, g_{H,j}$  – соответственно начальные и расчетные расходы ресурса на  $j$ -ом потребителе;  $NLoad$  – число потребителей.

Расходы ресурса на потребителях для гидродинамических сетей определяются по формуле

$$G_H = \text{sign}(P_H) \cdot \sqrt{|Y_H P_H|}, \quad (18)$$

где  $Y_H$  – проводимость нагрузок;  $P_H$  – напоры на нагрузках;  $\text{sign}(P_H)$  – знаковая функция, принимающая значения: 1, если  $P_H > 0$ ; -1, если  $P_H < 0$ .

В общем случае нелинейная зависимость (18) определяется физическими свойствами соответствующих потребителей.

Минимизация невязок осуществляется методом Ньютона.

В общем случае расчет ведется с использованием нелинейной функциональной зависимости кондуктивного характера вида (7).

Расчет сети с аккумуляторами рассмотрим на простом примере аккумулирующего узла. Расчет в этом случае происходит при минимизации невязки по напору в аккумулирующем узле, в который входит и выходит по одной ветви (рис. 6).

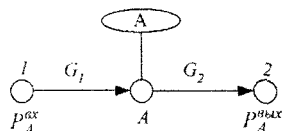


Рис. 6. Аккумулирующий узел сети

Материальный баланс аккумулятора

$$M_{A,k} = (M_{A,k-1} + \Delta t(G_{1,k-1} - G_{2,k-1}))^+, \quad (19)$$

где  $M_A$  – масса, кг;  $\Delta t$  – шаг по времени;  $k$  – текущий шаг решения.

Связь материального баланса с параметрами режимов аккумулятора определяется его физическими свойствами. Так, в случае, если рассматриваемый ресурс представляет собой газ, то

в соответствии с уравнением Клапейрона

$$P_A V_A = M_A R_A T_A, \quad (20)$$

где  $P_A$  – напор, Па;  $V_A$  – объем, м<sup>3</sup>;  $T_A$  – абсолютная температура, К;  $R_A$  – индивидуальная газовая постоянная.

Из (20) следует функциональное уравнение связи

$$P_{A,k} = A_A M_{A,k}, \quad (21)$$

где  $A_A = R_A T_A / V_A$  – интегральное внутреннее сопротивление,

или в общем случае здесь используются экспериментальные характеристики на основе разложения в ряд

$$P_{A,k} = \sum_{i=1}^n A_{Ai} M_{A,k}^i. \quad (22)$$

При расчете сети с аккумуляторами исходным параметром является напор в узле входной ветви аккумулятора  $P_{A,k}^{max}$ . Результат расчета – напор в узле выходной ветви аккумулятора  $P_{A,k}^{max}$ , полученный на основе вариации  $P_{A,k}^{max}$  как входного фактора, с целью достижения равенства  $P_{A,k}^{max} = P_{A,k}^{max}$ .

Уравнение по эмпирическим данным находим как

$$P_{A,k} = f(\Delta M_{A,k}), \quad (23)$$

$$\Delta M_{A,k} = \Delta t(G_{1,k} - G_{2,k}). \quad (24)$$

В итоге расчет ведется по соотношениям (23), (24).

В общем случае расчет аккумулирующей подсистемы основывается на решении дифференциальных уравнений вида (2), (3), описывающих динамику потоков. При этом могут быть использованы самые разнообразные методы решения дифференциальных уравнений сетей как с сосредоточенными, так и распределенными параметрами. Так, для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных базовым является метод сеток.

При моделировании сетей возникает необходимость регулирования пропускных способностей дуг сети с целью изменения расходов и напоров энергоресурса. Для этого вводится модель регулятора.

Регулятор можно представить в виде следующей структуры (рис. 7).

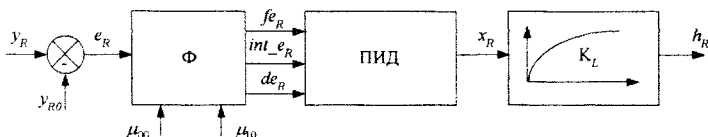


Рис. 7. Блочная схема регулирования

Здесь на вход подаются измеряемая величина  $y_R$  и уставка данной величины  $y_{R0}$ . По указанным входным данным вычисляется невязка  $e_R$ , поступающая на вход экспоненциального фильтра, который необходим для сглаживания потоков энергоресурсов в сетях с импульсной нагрузкой. Выходными величинами фильтра являются пропорциональная ( $fe_R$ ), интегральная ( $int_e_R$ ) и дифференциальная ( $de_R$ ) составляющие невязки, поступающие на вход ПИД-регулятора. Выход ПИД-регулятора  $x_R$  умноженный на коэффициент  $K_L$  представляет собой значение регулируемой величины  $h_R$ . В общем случае  $K_L$  является нелинейной функцией, определяемой эмпирически.

В качестве измеряемых величин используют напор в узле либо расход энергоресурса в дуге. Регулируемой величиной является сопротивление дуги, изменяя которое необходимо свести невязку на входе экспоненциального фильтра к минимальному значению. Невязка между измеряемой величиной и ее уставкой

$$e_{R,k} = y_{R,k} - y_{R0}. \quad (25)$$

Регулируемое значение сопротивления определяется по формуле

$$x_{R,k} = K_{R0} fe_{R,k} + K_{R1} int_e_{R,k} + K_{R2} de_{R,k}, \quad (26)$$

где  $k$  – текущий шаг решения;  $K_{R0}$ ,  $K_{R1}$ ,  $K_{R2}$  – значения соответственно пропорционального, интегрального, дифференциального коэффициентов регулятора.

Соотношения для нахождения интегральной, пропорциональной, дифференциальной составляющей невязки следующие

$$int_e_{R,k} = int_e_{R,k-1} + \Delta t fe_{R,k} + 0,5 \Delta t^2 de_{R,k}, \quad (27)$$

$$\begin{cases} fe_{R,k} = 2c_\phi \mu_{0,k} - c_\phi^2 \mu_{1,k}; \\ de_{R,k} = -c_\phi^3 \mu_{1,k} + c_\phi^2 \mu_{0,k}, \end{cases} \quad (28)$$

где  $\Delta t$  – шаг по времени;  $c_\phi$  – константа, определяемая как обратная величина от постоянной времени фильтра  $\tau_\phi$  ( $c_\phi = 1/\tau_\phi$ );  $\mu_i$  –  $i$ -е моменты входного сигнала

$$\begin{cases} \mu_{0,k} = \frac{\tau_\phi}{\tau_\phi + \Delta t} (\mu_{0,k-1} + \Delta t \cdot e_{R,k}); \\ \mu_{1,k} = \frac{\tau_\phi}{\tau_\phi + \Delta t} (\mu_{1,k-1} + \Delta t \cdot e_{R,k}). \end{cases} \quad (29)$$

## Идентификация граничных производственных характеристик элементов сетей и систем

Для моделирования потоков энергоресурсов в сетях и системах необходимо знать реальные производственные характеристики соответствующих элементов сетей и систем, которые, как правило, зависят от множества внутренних режимных факторов. При моделировании сложных сетей и систем не представляется возможным учесть все множество режимных факторов вследствие их большого многообразия для различных составляющих технологических процессов. Поэтому в работе предлагается использовать в качестве производственных характеристик элементов сетей не только среднестатистические характеристики, но и мажорантные и минорантные, которые в совокупности описывают рабочую область производственных характеристик. В дальнейшем мажорантные и минорантные характеристики будем называть граничными.

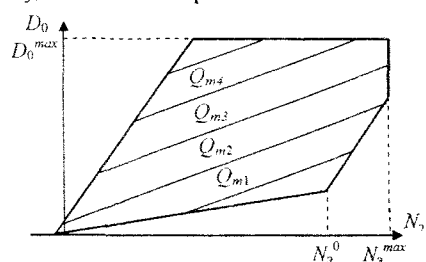


Рис. 8. Паровая характеристика турбины

В качестве примера на рис. 8 представлена паровая характеристика турбины электрической станции. Паровая характеристика состоит из базовой зависимости выработки пара ( $D_0$ ) от выработанной электрической мощности ( $N_s$ ) и тепловой мощности ( $Q_m$ ). Реальная диаграмма отличается от базовой на величину поправок по внутренним режимным факторам: температуре и давлению свежего пара,

давлению в теплофикационном и конденсационном отборах, температуре подачи сетевой воды и другим. В итоге паровая характеристика в линейном приближении будет иметь вид:

$$D_0 = a_0 + a_1 N_s + a_2 Q_m + \langle \text{поправки} \rangle. \quad (30)$$

Использование точной характеристики (30) при моделировании не представляется возможным, т.к. невозможно учесть все текущие значения внутренних факторов режимов турбин. Поэтому целесообразно использовать граничную внешнюю характеристику турбины, определенную при оптимальных сочетаниях внутренних факторов, например, по критерию минимума потребления пара:

$$D_0 = b_0 + b_1 N_s + b_2 Q_m. \quad (31)$$

Рассмотрим вопрос определения граничных производственных характеристик узлов на основе данных эксплуатации.

Решение задачи построения граничных характеристик предлагается осуществлять в данной работе на основе двух этапов. На первом этапе на основе решения задачи кластеризации данных из всей совокупности данных эксплуатации выделяются граничные (мажорантные и минорантные). На втором этапе с использованием граничных данных находятся непосредственно граничные характеристики.



Постановка задачи кластеризации данных на мажорантные и минорантные имеет следующие особенности.

1. Наличие ошибок в измерении значений производственных характеристик элементов сетей и систем.

2. Неполнота информации о производственных характеристиках, содержащихся в данных эксплуатации.

Поэтому решение задачи кластеризации должно включать в себя:

1) сглаживание ошибок в данных;

2) регуляризацию постановки задачи.

С учетом сказанного в работе предложена следующая постановка задачи кластеризации, которую для определенности будем рассматривать как выделение мажорантных данных.

В основе постановки задачи лежит система неравенств

$$p(\bar{a}, x_s) > y_s : \mu_s, s \in I_s; \quad (32)$$

$$p(\bar{a}, x_s) > y_s : \mu_s, s \in I_p, \quad (33)$$

где  $p(\bar{a}, x_s)$  – дискриминантная функция, выделяющая мажорантные данные из общей совокупности данных;  $y_s, x_s$  – статистические данные о производственных характеристиках;  $\bar{a}$  – вектор искомых параметров дискриминантной функции;  $\mu_s$  – характеристическая функция соответствующего  $s$ -го неравенства ( $\mu_s = 1$ , если неравенство выполняется;  $\mu_s = 0$ , в противном случае);  $I_s, I_p$  – соответственно индексное множество экспериментальных и регуляризующих данных.

Система неравенств (32)–(33) соответствует двум наборам данных, используемых при решении задачи. Набор данных эксплуатации ( $I_s$ ) отражает результаты наблюдений реальных значений производственных характеристик элементов сетей и систем в процессе эксплуатации. Регуляризующий набор данных ( $I_p$ ) является дополнительным и используется для восполнения недостающей информации, которой не содержится в данных реальных наблюдений. В качестве регуляризующих наборов данных могут быть использованы нормативные данные, экспертные оценки и др.

Выбор значений вектора параметров дискриминантной функции ( $\bar{a}$ ) осуществляется по критерию максимального взвешенного числа выполненных неравенств (32)–(33):

$$N_e = (1 - \lambda) \sum_{s \in I_s} \mu_s + \lambda \sum_{s \in I_p} \mu_s, \quad \lambda \in [0, 1] \quad (34)$$

при ограничении

$$N_{max} = \sum_{s \in I_s \cup I_p} (1 - \mu_s) \geq N_{об}^{min} + N_{нов} = N_{пол}. \quad (35)$$

Здесь  $\lambda$  – вес регуляризующих данных;  $N_{об}^{min}$  – минимально допустимый размер обучающей выборки данных, необходимых для определения неизвестных значений вектора  $\bar{a}$  ( $N_{об}^{min} = \dim \bar{a} + 1$ );  $N_{нов}$  – размер поверочной выборки данных, на которых оценивается точность построенной дискриминантной функции ( $N_{нов} \geq 1$ ).

Вес регуляризирующих данных  $\lambda$  выбирается из условия корректности постановки задачи кластеризации. При  $\lambda = 0$  задача решается только на экспериментальных данных и в общем случае является некорректно поставленной. При  $\lambda = 1$  задача решается только на регуляризирующих данных и по определению является корректно поставленной. Однако при этом получаемое решение не отражает реальные экспериментальные данные. Поэтому при выборе значения коэффициента  $\lambda$  необходимо задавать минимально возможное значение, при котором сохраняется корректность постановки задачи.

Алгоритм решения задачи кластеризации следующий.

1<sup>0</sup>. Задаются начальные значения веса регуляризирующих данных  $\lambda$  и весов данных  $\alpha_s = 1$ .

2<sup>0</sup>. Методом взвешенных наименьших квадратов решается система уравнений

$$p(\bar{a}, x_s) = y_s : (1 - \lambda)\alpha_s, \quad s \in I_s; \quad (36)$$

$$p(\bar{a}, x_s) = y_s : \lambda\alpha_s, \quad s \in I_p. \quad (37)$$

3<sup>0</sup>. Вычисляется превышение выходного эффекта  $y_s$  над значением дискриминантной функции при входных факторах  $x_s$ ,

$$\Delta y_s = y_s - p(\bar{a}, x_s). \quad (38)$$

4<sup>0</sup>. Определяются веса данных

$$\alpha_s = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta y_s > 0; \\ \gamma, & \text{если } \Delta y_s < 0, \end{cases} \quad (39)$$

где  $\gamma$  определяет скорость сходимости алгоритма. При  $\gamma = 0$  – максимальная сходимость, однако при этом на первой итерации решения может выполняться неравенство  $N_{\text{маж}} < N_{\text{дон}}$ . При  $\gamma = 1$  решение заканчивается на первой итерации, и в качестве мажорантных точек являются те, что лежат выше средней характеристики. Величина  $\gamma$  в общем случае выбирается из условия выполнения ограничения (35).

5<sup>0</sup>. Данные, которые имеют вес  $\alpha_s = 1$  являются мажорантными. Подсчитывается их количество  $N_{\text{маж}}$ .

6<sup>0</sup>. Число мажорантных данных  $N_{\text{маж}}$  сравнивается с допустимым числом данных  $N_{\text{дон}}$ .

Если на первой итерации решения  $N_{\text{маж}} < N_{\text{дон}}$ , то постановка задачи некорректна и необходимо дополнить число регуляризирующих данных. Если данное неравенство выполняется на итерации  $\neq 1$ , то необходимо вернуться к значениям переменных на предыдущей итерации.

Если  $N_{\text{маж}} > N_{\text{дон}}$ , то осуществляется переход к решению задачи взвешенных уравнений (к п. 2<sup>0</sup>).

Решением задачи кластеризации является множество мажорантных данных.

### Моделирование и оптимизация режимных параметров технологической паровой сети промплощадки ОАО «ММК»

Схема моделирования фрагмента технологической паровой сети промплощадки ОАО «ММК» – сетевой район ККЦ и КХП представлена на рис. 9.

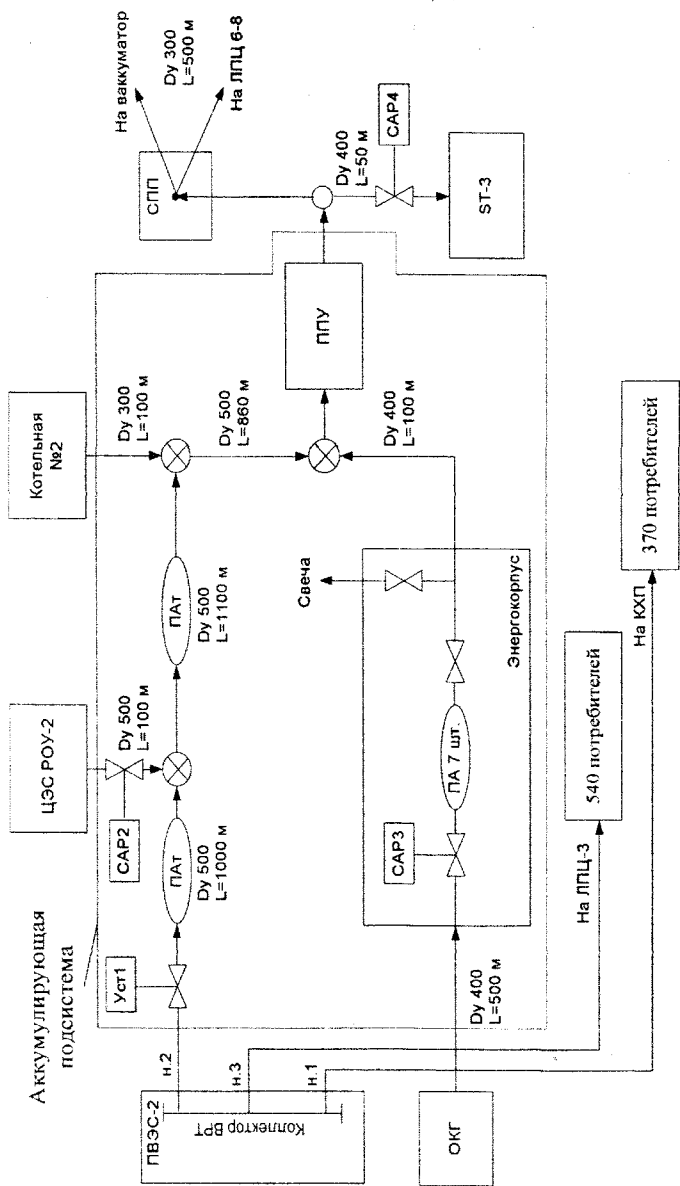


Рис. 9. Схема моделирования технологической паровой сети сетевого района ККЦ и КХП промплощадки ОАО «ММК»  
Здесь СПП – система перераспределения пара, ПА – паровой аккумулятор, ПАт – аккумулялирующая емкость паропровода

Базовым источником пара здесь является турбина с противодавлением ВРТ-25 паровоздушной электрической станции №2 (ПВЭС-2). Она обеспечивает снабжение паром по нитке №2. В качестве резервного источника пара выступает редукционно-охладительная установка РОУ-2 центральной электрической станции (ЦЭС), обеспечивая в автоматическом режиме подачу пара в нитку №2 при снижении давления ниже допустимого уровня. Следующими дополнительными источниками пара являются котельная № 2, а также котлы охладителя конверторных газов (ОКГ). Паропровод Ду500, соединяющий ПВЭС-2 и пароперегревательное устройство (ППУ), представляет собой длинную линию, которая обладает повышенной аккумулирующей способностью и фактически является аккумулятором пара. Одним из центральных элементов пароснабжения площадки ККЦ и КХП является энергокорпус (ЭК). Режим работы ЭК определяется паровыми аккумуляторами (ПА). Заряд ПА производится от котлов ОКГ.

На схеме указаны уставка подачи пара на выходе станции ПВЭС-2 (Уст1), уставка подачи пара через РОУ-2 ЦЭС и на входе станции ST-3 (САР2, САР4), а также уставка подачи пара (по напору) для пароаккумуляторов (САР3).

Проблемным вопросом пароснабжения площадки ККЦ и КХП ОАО «ММК» является обеспечение максимальной подачи пара на станцию ST-3 с целью увеличения выработки электроэнергии при полном удовлетворении снабжения паром технологических потребителей, наиболее приоритетным из которых является вакууматор доменного производства. Вакууматор работает циклически, частота включений зависит от количества плавок стали. При этом подача пара на вакууматор в пиковом режиме достигает 30% от общего расхода пара на входе ППУ. Тем самым работа вакууматора создает существенное ограничение на пароснабжение станции ST-3 и обуславливает пониженные объемы выработки электроэнергии на ST-3 в зимнее время, когда испытывается дефицит пара.

Задача оптимизации режима пароснабжения промплощадки ККЦ и КХП состоит из двух задач. Первая задача оптимизации формулируется следующим образом: при заданных возмущающих воздействиях на систему пароснабжения обеспечить максимум среднего значения подачи пара на станцию ST-3 за счет рационального выбора уставок Уст1, САР2-САР4. Вторая задача оптимизации состоит в минимизации среднеквадратичного отклонения подачи пара на станцию ST-3 за счет рационального выбора параметров регуляторов САР2-САР4.

Задача решалась экспериментальным методом крутого восхождения на модели. В результате оптимизации указанных режимных параметров технологической паровой сети промплощадки ОАО «ММК» выработка электрической энергии на станции ST-3 увеличилась на 1,1 МВт. Полученный результат проверен экспериментально и подтвержден актом внедрения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Одним из подходов к повышению эффективности технологических процессов является выявление резервов снабжения их энергетическими ресурсами и направление выявленных резервов на повышение выпуска продукции. Для решения указанной задачи предложено производить моделирование и оптимизацию параметров потоков распределения ресурсов в производственных комплексах с учетом динамики их аккумуляции.

2. Для моделирования энергетических потоков ресурсов в сложных производственных сетях предложена многослойная модель сети, позволяющая свести общую задачу расчета сложной сети к совокупности простых подзадач, каждая из которых имеет естественную физическую постановку. Модель включает следующие слои: деревья графа сети, описывающие ее структуру, хорды, потребители, аккумулярующие подсистемы, регуляторы, оперативное управление. При этом аккумулярующие подсистемы описываются динамическими операторами емкостного характера, регуляторы – моделями процессов в пространстве состояний, остальные элементы сети описываются нелинейными функциональными характеристиками, в частности, деревья и хорды графа сети – резистивными характеристиками, потребители – кондуктивными.

3. Разработан алгоритм автоматизации построения многослойной модели сложной производственной сети по исходным данным ее описания в комплексе. На основе алгоритма разработана универсальная программа моделирования сложных производственных сетей на основе многослойного подхода.

4. При моделировании необходимо знать производственные характеристики элементов сетей и систем, зависящие от множества режимных факторов, которые сложно учесть вследствие их большого многообразия. Поэтому в качестве производственных характеристик используются граничные характеристики, очерчивающие область допустимых значений.

5. Предложен алгоритм и программа идентификации граничных производственных характеристик, основанные на кластеризации данных эксплуатации и регуляризации постановки задачи кластеризации, исходя из априорных данных.

6. Произведено моделирование и оптимизация режимов пароснабжения сетевого района кислородно-конверторного цеха (ККЦ) и коксохимического производства (КХП) промплощадки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В результате оптимизации параметров и рациональной настройки систем автоматического регулирования зарядно/разрядными процессами пароаккумуляторов выявлены резервы пара и повышена выработка электроэнергии на электрической станции ST-3 на 1,1 МВт.

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ВЕДУЩЕМ РЕЦЕНЗИРУЕМОМ ЖУРНАЛЕ ВАК

1. Безруков, Д.А. Об оптимальной загрузке агрегатов ТЭЦ / Д.А. Безруков, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып. 3. – № 9(38). – С. 19–21.

2. Казаринов, Л.С. Алгоритм построения эффективных характеристик оборудования по данным эксплуатации / Л.С. Казаринов, Д.А. Безруков, О.В. Попова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып. 3. – № 9(38). – С. 38.

3. Казаринов, Л.С. Методика оптимизации потребления энергетических ресурсов на электрических станциях / Л.С. Казаринов, Д.А. Безруков, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып. 3. – №9 (38). – С. 39–43.

4. Попова, О.В. Подход к расчету сложных паровых сетей с учетом динамики аккумулярования пара / О.В. Попова, Л.С. Казаринов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. – Вып. 4. – №14 (69). С. 78–83.

## ДРУГИЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Попова, О.В. Метод идентификации эффективных характеристик энергетического оборудования / О.В. Попова, Л.С. Казаринов // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: матер. всеросс. научно-практич. конф. – Магнитогорск: МГТУ, 2005.

2. Казаринова, В.Л. Идентификация эффективных производственных характеристик в АСУ ТП с использованием граничных оценок / В.Л. Казаринова, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // УИТ: сб. докладов. – СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2005.

3. Казаринов, Л.С. Оценка эффективности производственных процессов на основе метода обобщенного энергетического баланса / Л.С. Казаринов, О.В. Попова // Теория и практика совершенствования административно-организационного управления с использованием современных информационных технологий и систем: сб. науч. тр. / под ред. д.т.н., проф. О.В. Логиновского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, ЦНТИ, 2005. – С. 183–186.

4. Казаринов, Л.С. Метод идентификации эффективных рабочих характеристик производственных систем по данным эксплуатации / Л.С. Казаринов, Д.А. Безруков, О.В. Попова // Теория и практика совершенствования административно-организационного управления с использованием современных информационных технологий и систем: сб. науч. тр. / под ред. д.т.н., проф. О.В. Логиновского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, ЦНТИ, 2005. – С. 186–193.

5. Попова, О.В. Метод оптимизации технологических процессов на основе идентификации эффективных рабочих характеристик оборудования по данным эксплуатации / О.В. Попова // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сб. рефератов научно-исследовательских работ студентов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – С. 232–233.

6. Казаринов, Л.С. Метод распределенного расчета паровых сетей / Л.С. Казаринов, О.В. Попова // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий: краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 121.

7. Попова, О.В. Нейросетевой метод расчета паровых сетей / О.В. Попова // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сб. рефератов научно-исследовательских работ студентов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2006.

Формат 60x84 1/16. Бумага ВХИ 80 гр. Объем 1,4 усл. п. л.  
Тираж 100 экз.

Изготовлено в полном соответствии с качеством  
предоставленных оригиналов заказчиком  
в ООО «Издательство «РЕКПОЛЬ»

Государственная лицензия на полиграфическую деятельность  
ПД № 11-0029 от 18.02.2000 года.  
454048, г. Челябинск, пр. Ленина, 77  
тел. (351) 265-41-09