

## СИГНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МАКРОМОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

*И.Е. Вахромеев, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер*

Рассматривается решение задач оперативного управления сложными гидравлическими сетями при переменных нагрузках с использованием сигнально-ориентированной макромодеи сети. Предложенная модель позволяет оперативно решать обратные задачи динамики сетей, возникающие при определении объемов подачи дополнительных ресурсов, необходимых для парирования неконтролируемых изменений нагрузок и стабилизации подачи ресурсов потребителям. Приводится пример решения задачи стабилизации подачи пара от паровой сети на электрическую станцию металлургического предприятия при переменной нагрузке технологического потребителя.

*Ключевые слова:* гидравлические сети, моделирование, стабилизация подачи ресурсов, переменные нагрузки.

### **Введение**

Управление режимами сложных сетей паро- и водоснабжения на крупных промышленных предприятиях играет важную роль в обеспечении эффективного снабжения ресурсами технологических потребителей. При этом важнейшей практической задачей при проектировании и эксплуатации АСУ ТП сетями является задача повышения эффективности управления по показателям экономии энергетических ресурсов.

Проблемы математического моделирования, расчета и оптимизации тепловых сетей промышленных предприятий освещены в трудах многих авторов [1, 3, 4, 9, 10].

Расчет инженерных сетей в настоящее время обычно выполняется для установившихся режимов, что само по себе представляет сложную задачу для сложных сетей. Типовым подходом для расчета напоров и расходов ресурсов в сложных сетях являются методы, основанные на решении замкнутых систем нелинейных алгебраических уравнений. Системы уравнений составляются из условий соблюдения закона сплошности и закона сохранения энергии, т. е. аналогов первого и второго законов Кирхгофа для всех независимых узлов и контуров, а также с учетом замыкающих уравнений связи между напорами и расходами для всех участков сети [7, 9].

С целью повышения эффективности управления сетями в рамках АСУ ТП целесообразно использовать модели сетей паро- и водоснабжения, позволяющие осуществлять оперативные упреждающие оценки режимных параметров сетей при структурных переключениях и резко переменной нагрузке. Однако для технологических сетей паро- и водоснабжения масштаба крупных промышленных предприятий, например, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», когда протяженность сетей составляет около 300 км, переменные нагрузки достигают в пике значений 50 и более т/ч, при наличии дополнительных переменных источников энергетических ресурсов построить точную динамическую модель сети на основе рассмотренных выше методов является весьма трудоемкой задачей. Выход из данного положения видится в построении макромоделей сетей, параметры которых могут быть идентифицированы в приемлемые сроки при допустимых затратах финансовых средств. Упрощенные макромодеи, вследствие своей обзорности, дают возможность использовать современные методы модельно-упреждающего управления, которые позволяют осуществлять эффективную стабилизацию параметров режимов технологических процессов.

Однако применительно к технологическим сетям металлургического производства данная задача исследована недостаточно, что определяет актуальность работы.

### **1. Обобщенное представление сетей**

Рассмотрим методику моделирования сложных гидравлических сетей.

Обобщенное физическое представление сетей приведено на рис. 1.

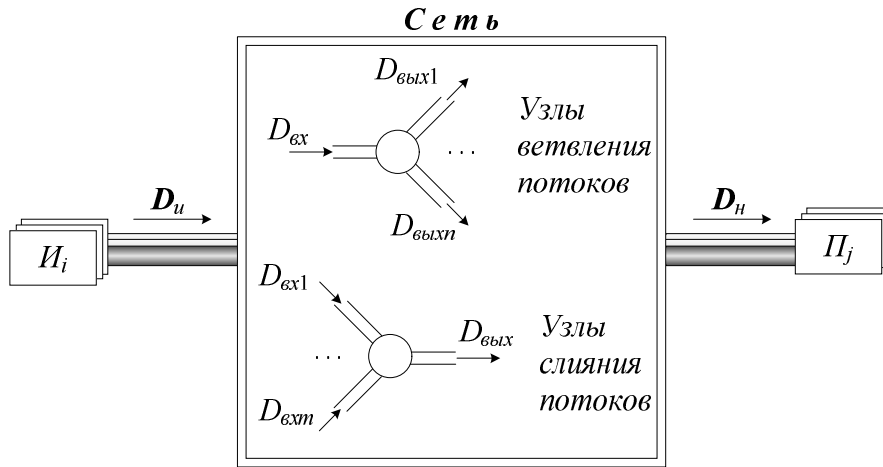


Рис. 1. Обобщенное физическое представление сетей:  
 $I_i$  –  $i$ -й источник сети;  $P_j$  –  $j$ -й потребитель сети;  $D_u$  – вектор потоков ресурсов от источников к сети;  $D_n$  – вектор потоков ресурсов от сети к потребителям;  
 $D_{вх}$ ,  $D_{вых}$  – входные и выходные потоки узлов соединений трубопроводов

В данном представлении обобщенная структура сети отражает процессы генерации, передачи, слияния, ветвления и потребления потоков ресурсов. Типовыми методами расчета сетей в физических представлениях являются метод узловых напоров и метод контурных потоков. При расчетах параметров потоков в подобных сетях, которые могут содержать тысячи узлов, недостатком является необходимость решения систем нелинейных уравнений большой размерности. Построение моделей крупномасштабных сетей является весьма трудоемкой задачей. Для оперативного управления подобными сетями требуется решать в реальном времени задачи идентификации параметров сети и задачи управления потоками. Для оперативного решения указанных задач в работе предлагается использовать сигнально-ориентированные макро-представления сетей [8].

Обобщенное сигнально-ориентированное макропредставление сетей (далее представление), соответствующее рис. 1, приведено на рис. 2.

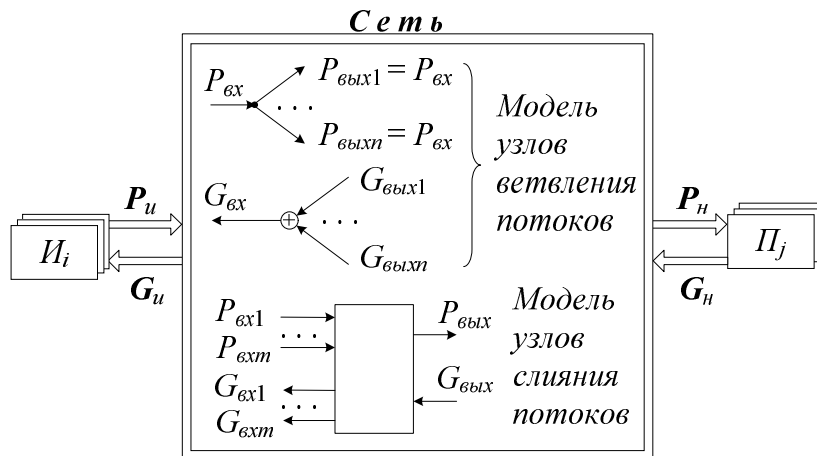
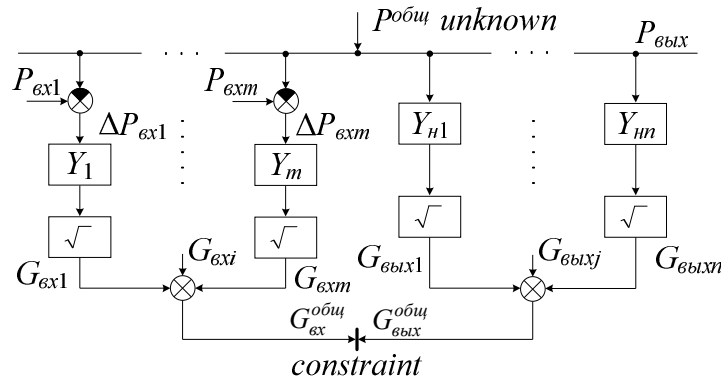


Рис. 2. Обобщенное сигнально-ориентированное представление сети:  
 $P_u, P_n, P_{вх}, P_{вых}$  – напоры ресурсов на элементах сети;  
 $G_u, G_n, G_{вх}, G_{вых}$  – расходы ресурсов в элементах сети

Критическим вопросом представления сети является модель узлов слияния потоков. Для широкого класса узлов слияния потоков модель можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3.



**Рис. 3. Модель узлов слияния и ветвления потоков:**  
 $P^{общ}$ ,  $P_{выix}$  – результирующий и выходной напор узла соответственно;  
 $P_{exi}$  – входные напоры узла;  $\Delta P_{exi}$  – потери напоров на соответствующих входах узла;  $Y_i$ ,  $Y_{ni}$  – проводимости входов и выходов узла соответственно;  
 $G_{ex}^{общ}$ ,  $G_{выix}^{общ}$  – результирующий расход на входе и выходе узла соответственно;  $G_{exi}$  – расходы на входе узла

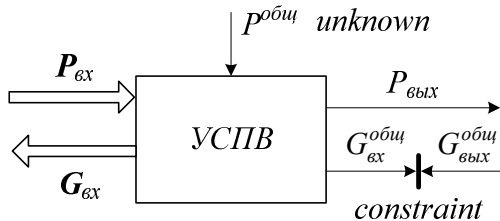
Графический элемент  $\begin{matrix} G_{ex}^{общ} \\ \leftarrow \\ \rightleftarrows \\ \rightarrow \\ G_{выix}^{общ} \end{matrix}$  на рис. 3 обозначает равенство  $G_{вх}^{общ} = G_{выix}^{общ}$  (“constraint”), являющееся базовым условием решения системы уравнений, описывающей процессы в модели узлов слияния и ветвления потоков:

$$\begin{cases} P_{выix} = P^{общ}, \\ \Delta P_{вxi} = P_{вxi} - P_{выix}, i=1, \dots, m, \\ s_i = \text{sign}(\Delta P_{вxi}); \\ G_{вxi} = s_i \sqrt{Y_i |\Delta P_{вxi}|}; \\ G_{вх}^{общ} = \sum_{i=1}^m G_{вxi} \end{cases} \quad (1)$$

где  $s_i$  – структурные переключения в сети.

Равенство  $G_{вх}^{общ} = G_{выix}^{общ}$  достигается с заданной точностью в результате изменения значений  $P^{общ}$ , определяемого переменной “unknown”.

Решение системы уравнений (1) можно выполнить, например, методом Ньютона. В этом случае расчетная схема узла слияния и ветвления потоков может быть представлена в виде схемы, приведенной на рис. 4.



**Рис. 4. Расчетная схема узла слияния и ветвления потоков: УСПВ – узел слияния и ветвления потоков**

С учетом модельных соотношений (1) расчет процессов в сети значительно упрощается. При этом, принимая во внимание инерционность процессов, происходящих во всех элементах сети, что позволяет использовать явные методы интегрирования дифференциальных уравнений, общий алгоритм расчета распадается на локальные алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений элементов сети. Результаты локальных расчетов передаются согласно схеме причинно-следственных связей в представлении сети. При этом необходимость в решении системы нелинейных алгебраических уравнений возникает лишь при анализе узлов слияния потоков. Количество нелинейных уравнений здесь равно числу узлов слияния потоков в сети, которое, как правило, не имеет больших величин. На этой основе можно осуществлять оперативный анализ процессов в сложной сети при решении задач идентификации и управления.

## 2. Идентификация сопротивлений и проводимостей элементов сети

Задача идентификации состоит в коррекции значений сопротивлений и проводимостей элементов сети в соответствии с оперативными данными измерений параметров потоков в сети. Коррекция выполняется с целью сближения расчетных параметров элементов сети с фактическими. Схема идентификации приведена на рис. 5.

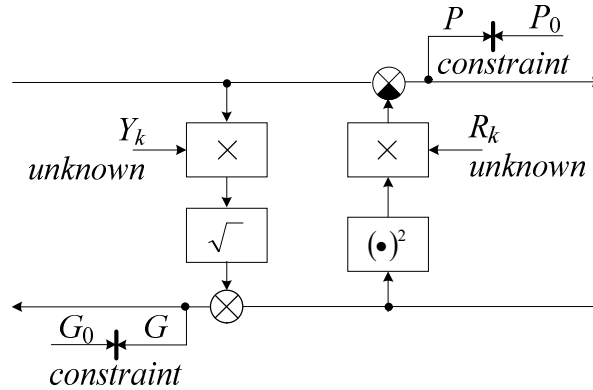


Рис. 5. Схема идентификации:  $\times$ ,  $\sqrt{\quad}$ ,  $(\cdot)^2$  – математические функции: умножение, извлечение квадратного корня и возведение в квадрат соответственно

На схеме идентификации сопротивления  $R_k$  и проводимости  $Y_k$  выделенного  $k$ -го элемента сети определяются переменными “unknown”, изменяя значение которых, необходимо достичь следующих равенств (с заданной точностью): расчетного значения напора потока ресурсов  $P$  фактическому значению  $P_0$  и расчетного значения расхода ресурсов  $G$  фактическому значению  $G_0$  (“constraint”).

## 3. Оперативное управление потоками ресурсов в гидравлических сетях

Рассмотрим решение задач оперативного управления потоками ресурсов.

Так, одной из центральных задач управления потоками ресурсов в сетях является стабилизация подачи ресурсов потребителям при неконтролируемых изменениях нагрузок. Решение данной задачи осуществляется согласно структурной схеме, приведенной на рис. 6.

На рис. 6 парирующий поток ресурсов  $D_u$  определяется с использованием переменной “unknown”, изменяя значение которой достигается равенство (с заданной точностью) расчетного значения потока ресурсов  $D_n$  заданному значению  $D_{n0}$  (“constraint”).

Решение задачи определения парирующего потока ресурсов  $D_u$ , приведенное на рис. 6, является некорректным, так как соответствует идеальной системе управления, работающей без ошибок. В этой связи в работе предлагается регуляризация решения указанной задачи с использованием специального регуляризующего оператора  $\alpha_R$ . Тогда структурная схема решения задачи определения  $D_u$  будет соответствовать рис. 7.

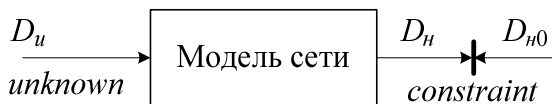


Рис. 6. Структурная схема определения  $D_u$

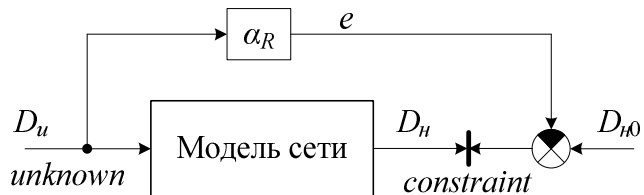


Рис. 7. Структурная схема определения  $D_u$  с регуляризацией:  $e$  – ошибка

На основе приведенной выше схемы реализуется оперативно-диспетчерское управление сетью.

Из принятой схемы решения задачи парирования возмущений в сети вытекают следующие требования к методике решения данной задачи:

- 1) модель сети должна быть ориентированной и отражать пути передачи потоковых сигналов от входных узлов введения управляющих потоков к выходным узлам стабилизируемых потоков на нагрузках;
- 2) алгоритмы парирования возмущений должны основываться на решении обратных задач динамики сети [6].

#### 4. Описание системы технологического пароснабжения металлургического предприятия

Задачи управления гидравлическими сетями рассмотрим на примере теплоэнергетического комплекса ОАО «ММК», который включает в себя:

- три электрические станции (ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС);
- тепловые паровые сети общей протяженностью 300 км;
- водяные сети общей протяженностью 600 км;
- более тысячи потребителей теплоэнергетических ресурсов, включающих металлургические цеха основного и вспомогательного производства.

Каждая станция содержит до десятка энергетических котлов и паровых турбин, вырабатывающих электрическую и тепловую энергию в теплофикационной воде и в паре на технологию. Каждая электрическая станция, а также тепловые паровые и водяные сети имеют собственные диспетчерские пункты, которые управляют режимами указанных объектов.

Так, на рис. 8 представлена общая схема системы пароснабжения площадки кислородно-конверторного цеха (ККЦ) и коксохимического производства (КХП) ОАО «ММК» [5, 11–13].

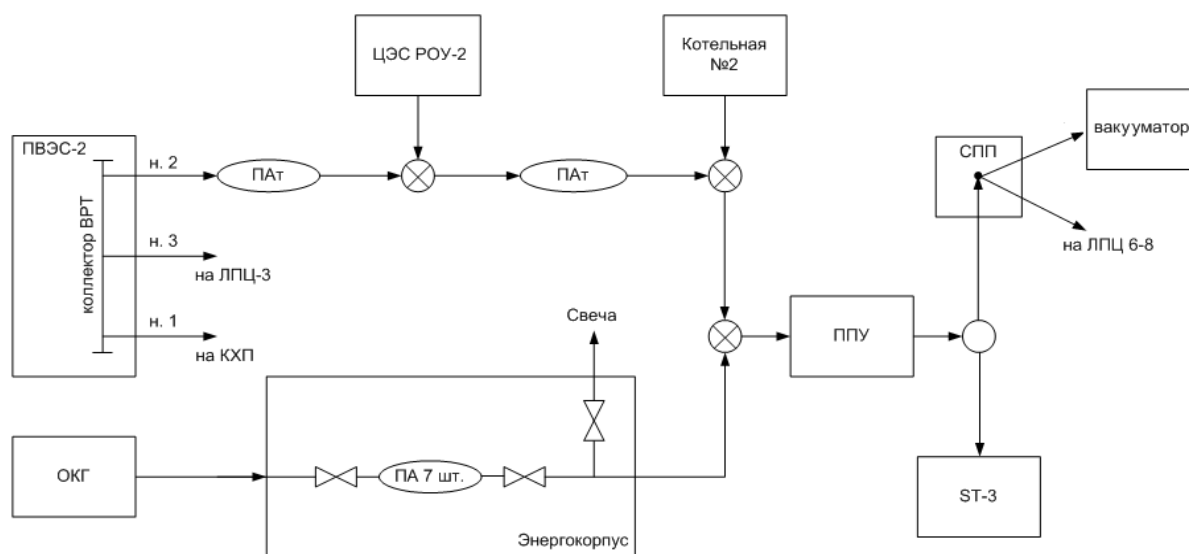


Рис. 8. Общая схема системы пароснабжения площадки ККЦ и КХП:

СПП – система перераспределения пара; ПА – паровой аккумулятор; ПАТ – аккумулирующая емкость паропровода; ЦЭС РОУ – редукционно-охладительные установки центральной электростанции; ОКГ – охладитель конверторных газов; ПВЭС – паровоздуходувная электростанция; ППУ – пароперегревательное устройство

Проблемным вопросом пароснабжения площадки ККЦ и КХП являются переменные режимы пароснабжения, которые характеризуются большими колебаниями производительности источников и большими колебаниями потребления пара. Для рационального использования пара в схеме предусмотрена буферная электростанция ST-3.

С целью более полной утилизации пара в данной системе ставится задача максимальной подачи пара на станцию ST-3 при обеспечении паром технологических потребителей, наиболее приоритетным из которых является вакууматор. Вакууматор работает циклически с интервалом 20–40 мин. Частота включений зависит от количества плавков стали и составляет в среднем около

5 раз в смену. При этом подача пара на вакууматор в пиковом режиме достигает 40–45 т/ч, что составляет до 30 % от общего расхода пара на входе пароперегревательного устройства (ППУ) (около 150 т/ч). 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. Для решения задачи оптимизации пароснабжения станции ST-3 необходимо исследовать пути пароснабжения, которые определяют ограничения на потребление пара.

Задача управления потоками в подобной сложной сети существенно базируется на принципе парирования потоковых возмущений в сети. В качестве подобного потокового возмущения выступает работа вакууматора, кроме того, котлы ОКГ имеют переменные режимы работы. Для парирования данных возмущений необходимо вводить в сеть управляющие потоки пара на основе использования РОУ ЦЭС, турбины ВРТ-2 ПВС и др. Расчет необходимых управляющих потоков пара можно сделать только на основе динамической макро модели сети с использованием методов упреждающего управления, так как сеть является протяженной и имеет явно выраженную динамику запаздывания потоков.

### 5. Пример макро модели

Для решения задачи определения парирующих потоков необходимо построение макро модели паровой сети. В качестве примера на рис. 9 приведена макро модель системы управления (СУ) зарядно-разрядными процессами парового аккумулятора (ПА).

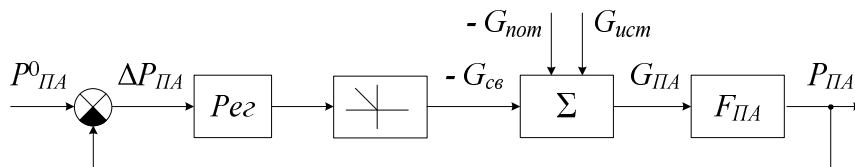


Рис. 9. Макро модель СУ зарядно-разрядными процессами ПА

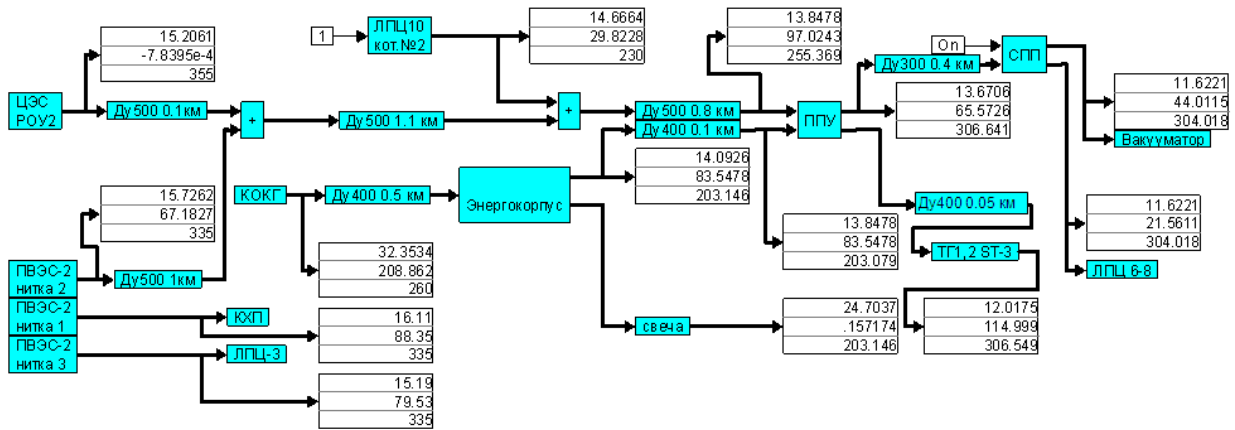
Здесь  $P^0_{ПА}$  – максимально допустимое значение давления пара в ПА;  $P_{ПА}$  – давление пара в ПА;  $\Delta P_{ПА}$  – разница между максимально допустимым значением давления пара в ПА и текущим значением давления пара в ПА;  $Reg$  – регулятор;  $F_{ПА}$  – модель ПА;  $G_{св}$  – расход пара на свече;  $G_{ПА}$  – расход пара в ПА;  $G_{ном}$  – суммарный расход пара на потребителях;  $G_{ист}$  – суммарный расход пара на источниках.

### 6. Экспериментальные исследования управления режимами пароснабжения

При экспериментальном исследовании управления режимами пароснабжения площадки ККЦ и КХП в рабочей станции АСУ моделирование режимов пароснабжения с контурами упреждающего управления осуществлялось с использованием программного пакета VisSim. Структура модели в программном пакете VisSim представлена на рис. 10 [11].

Как видно из рис. 10, элементы сети представлены в виде блоков (источник, трубопровод, потребитель и т. д.). Каждый такой блок содержит в себе все уравнения, описывающие протекающие в нем процессы с заданным приближением. Направление соединения блоков соответствует положительному направлению течения потока. По каждому из соединений передаются параметры пара: абсолютное давление  $P$ , массовый расход  $G$  и температура  $T$ , ориентированные согласно схеме представления сетей (см. рис. 2).

На рис. 11–13 приведены результаты экспериментального исследования режимов пароснабжения промплощадки ККЦ и КХП при следующих условиях: в работе 3 кислородных конвертора, включающиеся попеременно; в работе котельная №2 ЛПЦ-10; РОУ-2 ЦЭС включена в автоматическом режиме поддержания давления; при снижении давления пара на работающем вакууматоре происходит компенсирующее снижение подачи пара на турбины ST-3; регулирование подачи пара с ЭЖ на ППУ осуществляется клапаном Samson под управлением автоматического регулятора расхода пара.



Условные обозначения:

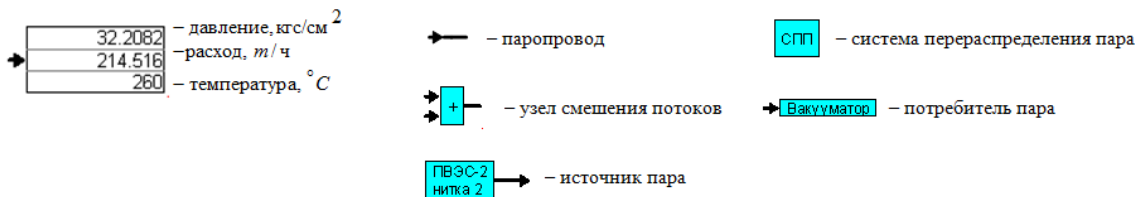


Рис. 10. Структура модели в программном пакете VisSim

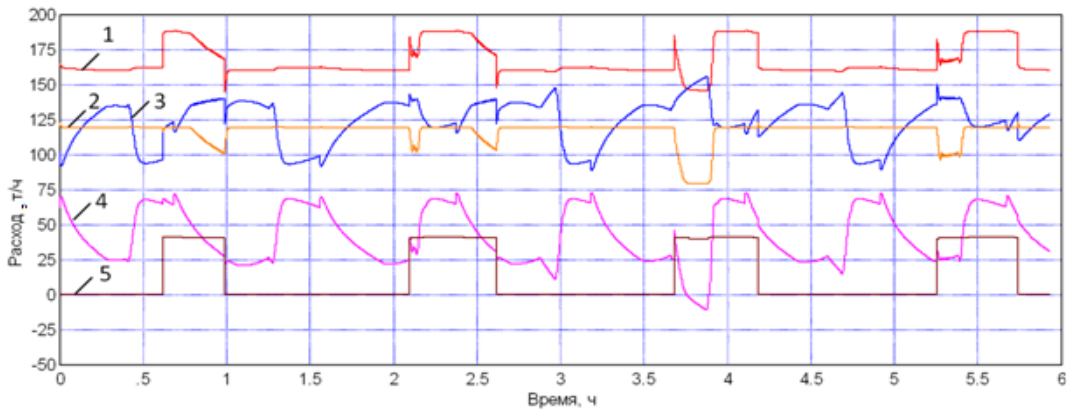


Рис. 11. Результаты экспериментального исследования: 1 – выход ППУ; 2 – турбины СТ-3; 3 – вход ППУ из сетей; 4 – вход ППУ из ЭК; 5 – вакууматор

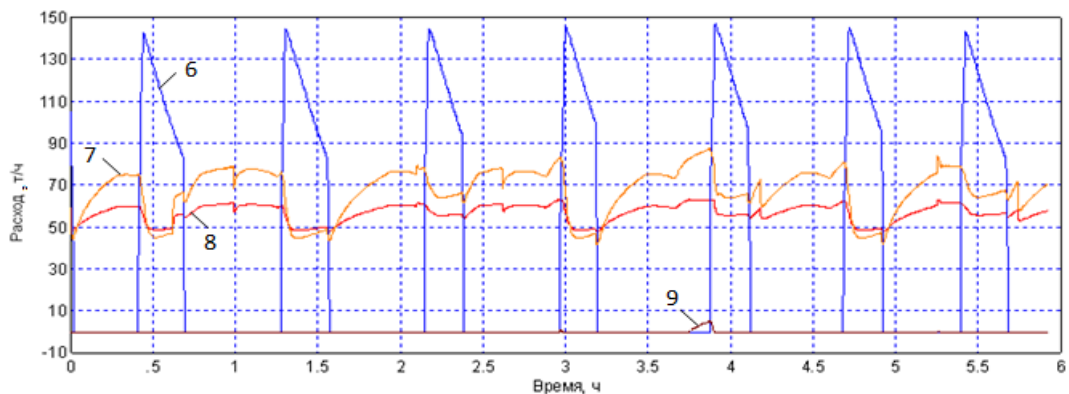


Рис. 12. Результаты экспериментального исследования: 6 – котлы ОКГ (результат, деленный на 2); 7 – котельная №2 ЛПЦ-10; 8 – ПВЭС н.2; 9 – ЦЭС РОУ-2

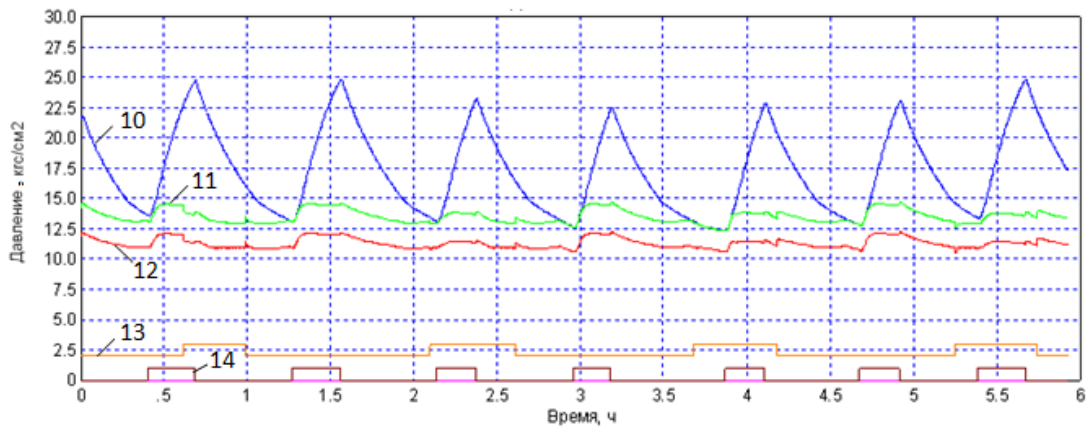


Рис. 13. Результаты экспериментального исследования:  
 10 – паровые аккумуляторы ЭК; 11 – выход ЭК на ППУ; 12 – вакууматор;  
 13 – циклограмма работы вакууматора; 14 – циклограмма работы котлов ОКГ

Как видно из графиков на рис. 11-13, в рассматриваемом режиме работы пики нагрузки вакууматора демпфируются за счет паровых аккумуляторов ЭК, повышения подачи пара от ПВЭС-2 н.2 и котельной №2 ЛПЦ-10. ЦЭС РОУ-2 практически выведена из работы. При этом наблюдаются вынужденные кратковременные снижения подачи пара на турбинный участок ПСЦ (со 120 до 80 т/ч) при включении вакууматора, благодаря чему обеспечивается требуемое давление пара на вакууматоре в районе 11–12 кгс/см<sup>2</sup> [2].

Анализ результатов моделирования и фактических данных эксплуатации показал, что разработанная модель адекватно отражает процессы пароснабжения станции ST-3 в различных режимах работы источников и потребителей пара, в частности при колебаниях потребления пара вакууматором 40–45 т/ч, с достаточной для практического использования точностью. При этом эффект от применения модельно-упреждающего управления состоял в стабилизации режимов пароснабжения станции ST-3, что позволило поднять производительность с 10 до 14 МВт.

**Выводы**

1. Перспективным подходом к решению задач автоматизированного управления технологическими сетями паро- и водоснабжения металлургических предприятий в настоящее время является использование модельно-упреждающего управления.
2. Для решения задач упреждающего управления в работе построена макро модель распределенной технологической паровой сети при наличии паровых аккумуляторов и резко переменных нагрузках.
3. Решение с использованием построенной модели задач стабилизации потоков ресурсов в технологической сети в работе предлагается осуществлять на основе решения уравнений обратных задач динамики сети.
4. Экспериментальные исследования показали, что применение модельно-упреждающего управления паровой сети сетевого района ККЦ и КХП позволило стабилизировать параметры технологической паровой сети комбината при резко переменной нагрузке со стороны вакууматора стали с диапазонами изменения в пиковом режиме до 40–45 т/ч. При этом за счет стабилизации параметров сети стало возможным повышение выработки электрической энергии станции ST-3 на 4 МВт.

*Литература*

1. Андрианов, Д.Е. Проектирование и расчет тепловой сети промышленного предприятия на основе математических моделей / Д.Е. Андрианов, Р.А. Штыков, Ю.В. Уткин // Промышленная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 24–38.



2. Вахромеев, И.Е. Распределенная автоматизированная система оперативного управления сетью технологического пароснабжения / И.Е. Вахромеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 12. – № 22 (198). – С. 70–74.
3. Евдокимов, А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
4. Зингер, Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
5. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки) / Л.С. Казаринов, И.Е. Вахромеев, Л.А. Коцев и др.; под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 228 с.
6. Казаринов, Л.С. Метод построения упреждающих оценок энергетической эффективности технологических процессов / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 12. – № 22 (198). – С. 57–62.
7. Казаринов, Л.С. Подход к расчету сложных паровых сетей с учетом динамики аккумуляции пара / Л.С. Казаринов, О.В. Попова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. – Вып. 4. – №14 (69). – С. 78–83.
8. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление /когнитивный подход/: научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.
9. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / под ред. В.Я. Хасилева, А.П. Меренкова. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
10. Стенников, В.А. Методы комплексной оптимизации развития теплоснабжающих систем / В.А. Стенников, Е.В. Сеннова, Т.Б. Ощепкова // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – № 3. – С. 44–54.
11. Шнайдер, Д.А. Моделирование динамических режимов парового аккумулятора / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, И.Е. Вахромеев // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 42–44.
12. Шнайдер, Д.А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумуляции / Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8. – № 17. – С. 45–49.
13. Шнайдер, Д.А. Распределенное управление пароснабжением промышленных потребителей на основе динамической программной модели / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, И.Е. Вахромеев // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 5. – С. 31–37.

Вахромеев Иван Евгеньевич, заместитель главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск); vakhromeev.ie@mmk.ru

Казаринов Лев Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), kazarinov@ait.susu.ru

Колесникова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), olgavropova@gambler.ru

Шнайдер Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), polytech@mail.ru

## SIGNAL-ORIENTED MACROMODEL OF HYDRAULIC NETWORKS

**I.E. Vakhromeyev**, Open Joint Stock Company «Magnitogorsk Iron and Steel Works»; Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation, vakhromeev.ie@mmk.ru

**L.S. Kazarinov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, kazarinov@ait.susu.ru

**O.V. Kolesnikova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, olgavpopova@rambler.ru

**D.A. Shnayder**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, polytech@mail.ru

Operational control of complex hydraulic networks with variable loads using signal-oriented macromodel of the network is considered. The proposed model allows to solve the inverse problems of the networks dynamics, consisted in calculations of the additional resources needed for parrying uncontrollable load changes and stabilization of resources supply to consumers. An example of steam parameters stabilization for an electric power station of a steel works is given.

*Keywords:* hydraulic networks, modeling, stabilization of resources supply, variable loads.

### References

1. Andrianov D.E., Shtykov R.A., Utkin Yu.V. Engineering and Calculation of Heat Network of Industrial Enterprises on the Basis of Mathematical Models [Proektirovanie i raschet teplovoy seti promyshlennogo predpriyatiya na osnove matematicheskikh modeley]. *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*. 2004, no. 3, pp. 24-38.

2. Vakhromeyev I.E. Distributed Automated System for Industrial Steam Supply Network Management [Raspredeleonnaya avtomatizirovannaya sistema operativnogo upravleniya set'yu tekhnologicheskogo parosnabzheniya]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika» [Bulletin of South Ural State University. Series «Computer technologies, Control, Electronics»]*. 2010, vol. 12, no. 22 (198), pp.70-74.

3. Evdokimov A.G., Tevyashev A.D., Dubrovskiy V.V. *Modelirovanie i optimizatsiya potokoraspredeleeniya v inzhenernykh setyah* [Modeling and Optimization of Stream Distribution in Engineering Networks]. Moscow, Stroyizdat, 1990, 368 p.

4. Zinger N.M. *Gidravlicheskie i teplovye rezhimy teplofikatsionnykh system* [Hydraulic and Heating Modes of Heating Systems]. Moscow, Energiya, 1986, 320 p.

5. Kazarinov L.S., Vakhromeyev I.E., Koptsev L.A., Shnayder D.A. i dr. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya v energosberezhenii (opyt razrabotki), pod red. L.S. Kazarinova* [Automated Control Systems in Energy Saving (the Experience of the Development), ed. L.S. Kazarinov]. Chelyabinsk, YuUrGU, 2010, 228 p.

6. Kazarinov L.S., Shnayder D.A. Method of Developing of Look-Ahead Energy Efficiency Estimation of Technological Processes [Metod postroeniya uprezhdayushchikh otsenok energeticheskoy effektivnosti tekhnologicheskikh processov]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika» [Bulletin of South Ural State University. Series «Computer technologies, Control, Electronics»]*. 2010, vol. 12, no. 22 (198), pp. 57-62.

7. Kazarinov L.S., Popova O.V., Calculation of Complex Steam Networks with Regards to Dynamics of Steam Accumulation [Podkhod k raschetu slozhnykh parovykh setey s uchetom dinamiki akumulirovaniya para]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuter-*

nye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika» [Bulletin of South Ural State University. Series «Computer technologies, Control, Electronics»]. 2006, vol. 4, no.14 (69). pp. 78-83.

8. Kazarinov L.S. *Sistemnye issledovaniya i upravlenie /kognitivnyy podhod/* [Systems Research and Management /Cognitive Approach/]. Cheljabinsk, Izdatel'skiy centr YuUrGU: Izdatel' T. Lur'e, 2011, 524 p.

9. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setey*, pod. red. V.Ya. Khasileva, A.P. Merenkova [Methods and algorithms of Heat Networks Calculation, ed. V.Ya. Khasileva, A.P. Merenkova]. Moscow, Energiya, 1978, 176 p.

10. Stennikov V.A., Sennova E.V., Oshchepkova T.B. Method of complex optimization of heat supply systems development [Metody kompleksnoy optimizatsii razvitiya teplosnabzhayushchikh sistem]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Izvestiya Russian Academy of Sciences. Energy]. 2006, no. 3, pp. 44-54.

11. Shnayder D.A., Divnich P.N., Vakhromeyev I.E. Modeling of steam accumulator dynamics [Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov parovogo akkumulyatora]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry]. 2009, no. 8, pp. 42-44.

12. Shnayder D.A. Operational Flow Control of Power Resources in Production Networks with Regards to Dynamics of Their Accumulation [Operativnoe upravlenie potokami energeticheskikh resursov v proizvodstvennykh setyakh s uchetom dinamiki ikh akkumulirovaniya]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»* [Bulletin of South Ural State University. Series «Computer technologies, Control, Electronics»]. 2008, vol. 8, no. 1, pp. 45-49.

13. Shnayder D.A., Divnich P.N., Vakhromeyev I.E. Steam supply distributed control of the industrial consumer from a dynamical programming model [Raspredelennoe upravlenie parosnabzheniem promyshlennykh potrebiteley na osnove dinamicheskoy programmnoy modeli]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Contemporary Technologies]. 2011, no. 5, pp. 31-37.

*Поступила в редакцию 21 марта 2013 г.*