

УДК 681.513.54, 681.518, 621.64/.69  
ББК 32.965, 31.391

## УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шнайдер Д. А.<sup>1</sup>

(Южно-Уральский государственный университет,  
Челябинск)

*В статье приведена постановка задачи упреждающего управления теплоэнергетическими системами металлургического производства по критериям энергетической эффективности. Предложен подход к решению поставленной задачи с использованием динамических оценок показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации. Приведен пример упреждающего управления системой пароснабжения металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности.*

Ключевые слова: энергетическая эффективность, упреждающее управление, теплоэнергетическая система.

### **1. Введение**

Теплоэнергетические системы металлургических предприятий представляют собой сложные производственные комплексы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумулярования и потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Режимы работы данных подсистем определяются режи-

---

<sup>1</sup> Шнайдер Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления (shnayder@ait.susu.ac.ru).

мами работы технологического оборудования основного металлургического производства и характеризуются существенными изменениями выработки и потребления ТЭР. Вместе с тем объемы потребления ТЭР напрямую определяют энергоемкость металлургического производства, а технические параметры ТЭР – качество выпускаемой продукции. Отсюда важной практической задачей является организация эффективного управления теплоэнергетическими системами металлургического предприятия, учитывающего динамику процессов выработки, распределения, аккумулирования и потребления ТЭР, а также влияние отклонений параметров ТЭР на качество пускаемой продукции.

Ведущую роль в повышении энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства играют автоматизированные системы управления. Базовым требованием к построению подобных систем является формирование текущей информации о технико-экономических параметрах технологических процессов. Перспективным подходом, позволяющим значительно повысить эффективность автоматизированного управления технологическими процессами по сравнению с существующим уровнем, является введение упреждающего управления по критериям энергетической эффективности и реализация на его основе соответствующих систем автоматизированного управления.

Поиску и реализации новых эффективных подходов и решений к энергосберегающему управлению сложными производственными процессами и системами были посвящены труды многих ученых [1, 3-5]. Однако методология упреждающего управления по критериям энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства в настоящее время недостаточно разработана, что и определяет актуальность данной работы.

## 2. Постановка задачи

Актуальной задачей автоматизированного управления технологическими процессами (ТП) является учет энергетической эффективности выпуска продукции. Другими словами, в АСУ помимо задач непосредственного управления ТП должен быть реализован контур управления по текущему значению показателя энергетической эффективности ТП.

В качестве показателя энергетической эффективности ТП обычно используется энергоемкость выпуска продукции, определяющая затраты ТЭР на единицу выпускаемой продукции, либо прямой показатель энергетической эффективности:

$$(1) \quad \varphi = \frac{P}{W},$$

где  $P$  – объем выпущенной продукции;  $W$  – соответствующий объем потребленных ТЭР.

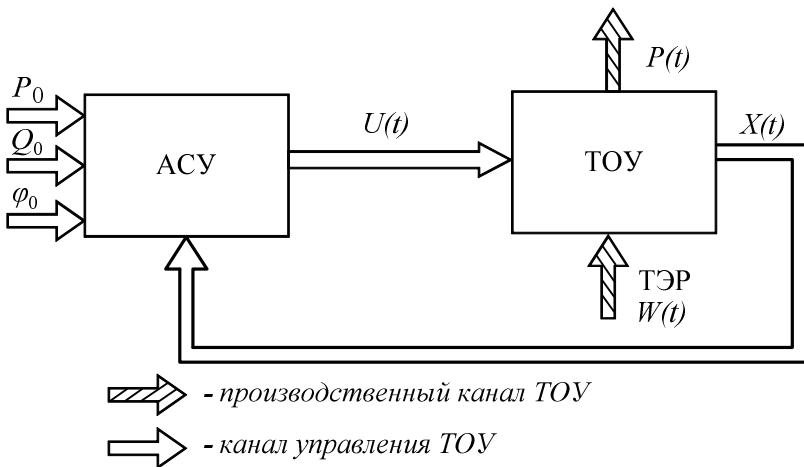


Рис. 1. Поточковая модель АСУ с учетом энергетической эффективности выпуска продукции

Обобщенная схема АСУ технологическим объектом управления (ТОУ) с учетом энергетической эффективности выпуска продукции представлена на рис. 1. Здесь АСУ формирует управляющие воздействия  $U(t)$  на ТОУ, исходя из текущего состояния ТОУ  $X(t)$ , заданной производственной программы выпуска продукции  $P_0$ , требуемых показателей качества выпускаемой продукции  $Q_0$  и требуемой энергетической эффективности выпуска продукции  $\varphi_0$ .

Критерии управления ТОУ могут быть записаны следующим образом:

$$(2) \min [P(t) - P_0],$$

$$(3) \max [\varphi(t)],$$

при ограничениях:

$$(4) Q(t) \geq Q_0, \varphi(t) \geq \varphi_0.$$

Одной из проблем обеспечения максимума энергетической эффективности (3) при оперативном управлении ТОУ является оценка текущего значения  $\varphi(t)$ . Дело в том, что реальные ТП характеризуются существенной динамикой процессов потребления ТЭР  $W(t)$  и выработки продукции  $P(t)$ , определяющей значительное запаздывание во времени по производственному каналу ТОУ (см. рис. 1). В связи с этим прямой расчет  $\varphi(t)$  по формуле (1) с подстановкой текущих  $P(t)$  и  $W(t)$  приведет к некорректной постановке задачи, при которой, к примеру, подача импульса ТЭР на входе ТОУ приведет к мнимому резкому уменьшению энергетической эффективности, так как соответствующий объем продукции еще не будет выработан.

Поэтому для оперативного управления энергетической эффективностью ТОУ в рамках АСУ, приведенной на рис. 1, необходима упреждающая оценка показателя  $\varphi'(t)$ , рассчитанная для синхронизированных по времени значений потребления ТЭР и выпуска продукции, т. е.

$$(5) \varphi'(t) = \frac{P(t + \tau_{np})}{W(t)}.$$

где  $\tau_{np}$  – интервал упреждения, определяемый запаздыванием в ТП;  $P(t + \tau_{np})$  – прогнозируемое значение выпуска продукции в результате потребления текущего объема ТЭР  $W(t)$ .

Одним из подходов к решению рассматриваемой задачи управления ТОУ (2)-(5) является использование для управления динамической модели объекта. Для этого могут быть применены различные методы, например, метод модельного прогнозирующего управления (МПУ) [1]. Суть метода МПУ состоит в решении задачи оптимального управления ТОУ на каждом шаге работы системы управления на основе прогноза поведения объекта, рассчитанного на модели. Последовательное решение задачи на множестве шагов позволяет получить оптимальное управление ТОУ в соответствии с заданным критерием управления и ограничениями.

Однако для рассматриваемого класса крупномасштабных распределенных нелинейных динамических систем, к которым относятся теплоэнергетические системы металлургических предприятий, построение точной математической модели является крайне сложной и объемной задачей. Вместе с тем, погрешность в оценке  $\varphi(t)$  даже в 1-2% при управлении энергетической эффективностью крупных ТОУ влечет за собой значительные экономические потери. Поэтому применение методов, основанных на построении математической модели ТОУ, для решения поставленной крупномасштабной задачи управления является ограниченным.

Корректное решение рассматриваемой задачи управления требует получения оперативных оценок показателей эффективности с высокой точностью, либо путем прямых приборных измерений, либо косвенно на основе динамических оценок. При этом усреднение по времени динамических оценок показателей должно обеспечивать сведение теплоэнергетического баланса ТОУ за отчетный период (обычно, месяц), т. е. фактическое среднее значение показателя энергетической эффективности  $\varphi^{cp}$  за отчетный период  $T_n$ , полученное по приборным данным на входе и выходе ТОУ, должно быть равно среднему значению

оценки данного показателя с погрешностью  $\delta$ , меньшей или равной заданному значению  $\varepsilon$ :

$$(6) \quad \varphi^{cp} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \varphi'(t) dt \pm \delta, \quad |\delta| \leq \varepsilon.$$

Это условие является обязательным требованием к приборным средствам измерения расхода ТЭР.

Таким образом, общая задача АСУ теплоэнергетическими системами металлургического производства может быть поставлена следующим образом: обеспечить управление ТООУ, удовлетворяющее критериям (2), (3) при ограничениях (4), на основе динамической оценки показателя энергетической эффективности (5), удовлетворяющей требованию (6) несмещенности оценки.

Ключевым вопросом в решении поставленной задачи, рассматриваемым далее, является метод получения динамической оценки энергетической эффективности (5) с учетом требования (6).

### **3. Динамическая оценка показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации**

Реальные производственные теплоэнергетические системы характеризуются существенной для управления динамикой, в том числе наличием временных задержек, связанных с транспортировкой ТЭР или продукции. В качестве примера, иллюстрирующего суть предлагаемого подхода, положим, что передаточная функция производственного канала ТООУ (вход – ТЭР, выход – продукция) состоит из энергетической характеристики ТП  $F(A)$ , где  $A = A(t)$  – множество параметров ТП, в общем случае зависящих от времени, и линейного динамического оператора  $L\{\}$ , представленного для наглядности в виде звена чистого запаздывания (см. рис. 2,а).

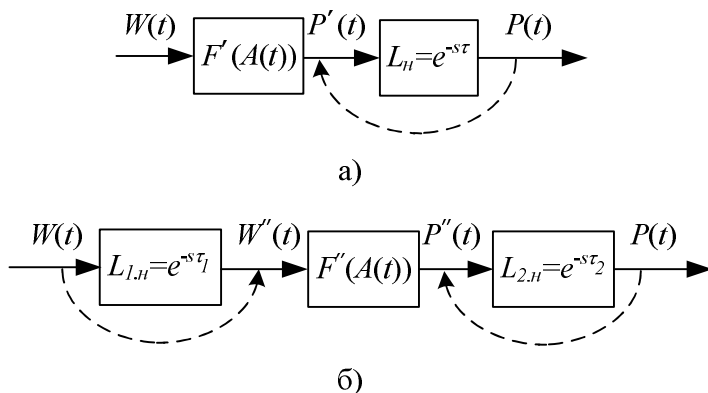


Рис. 2. Операция динамического приведения:  
 $L_n, L_{1,n}, L_{2,n}$  – динамические операторы;  
 $\tau, \tau_1, \tau_2$  – интервалы времени запаздывания

Тогда для примера на рис. 2,а упреждающая оценка (5) будет иметь вид:

$$(7) \quad \dot{\varphi}(t) = \frac{L_n^{-1}\{P(t)\}}{W(t)} = \frac{e^{+s\tau} \cdot P(t)}{W(t)} = \frac{P'(t)}{W(t)} = F'(A(t)),$$

где  $P'(t) = e^{+s\tau} \cdot P(t)$  – упреждающая оценка  $P(t)$ , полученная путем обратного динамического приведения выхода ТОУ ко входу.

Для распределенных ТОУ, характеризующихся значительным временным запаздыванием, может применяться операция частичного динамического упреждения, проиллюстрированная на рис. 2,б. Здесь упреждающая оценка показателя (5) образуется путем частичного динамического приведения выхода и входа ТОУ, т. е.:

$$(8) \quad \ddot{\varphi}(t) = \frac{L_{2,n}^{-1}\{P(t)\}}{L_{1,n}\{W(t)\}} = \frac{e^{+s\tau_2} \cdot P(t)}{e^{-s\tau_1} \cdot W(t)} = \frac{P''(t)}{W''(t)} = F''(A(t)),$$

где  $P''(t) = e^{+s\tau_2} \cdot P(t)$  – упреждающая оценка  $P(t)$ , полученная путем частичного обратного динамического приведения выхода ТОУ, а  $W''(t) = e^{-s\tau_1} \cdot W(t)$  – упреждающая оценка  $W(t)$ , полученная

путем частичного прямого динамического приведения входа ТОО к некоторой промежуточной точке в структуре динамической модели ТОО.

Как следует из (7) и (8), полученные упреждающие оценки  $\varphi'(t)$ ,  $\varphi''(t)$  соответствуют текущим значениям функциональных зависимостей  $F(A(t))$ ,  $F''(A(t))$ , представляющих собой энергетические характеристики ТОО. Таким образом, суть операции динамического приведения состоит в восстановлении текущего значения фактической энергетической характеристики ТОО на основании данных текущего потребления ТЭР и выпуска продукции без непосредственного измерения технологических параметров  $A(t)$  и построения полной математической модели ТОО.

Обратим внимание, что рассмотренные выше динамические операторы  $L_n$ ,  $L_{1,n}$ ,  $L_{2,n}$  являются нормированными, т. е. имеют единичные коэффициенты усиления. Поэтому для интервала времени наблюдения такого, что  $T_n \gg \tau_1$  и  $T_n \gg \tau_2$ , условие несмещенности оценки (6) будет выполняться.

Согласно (7), (8) получение упреждающих оценок требует обращения динамических операторов. Сложность такого обращения состоит в необходимости вычисления производных сигналов из-за наличия временных задержек и превышения порядка числителя над порядком знаменателя обращенной передаточной функции. Далее рассмотрим подход к получению обратных динамических операторов на основе метода экспоненциальной фильтрации [2].

Построение экспоненциальных фильтров базируется на представлении информационной составляющей фильтруемого сигнала в виде ряда:

$$(9) \quad x_0(t - \lambda) = \sum_i a_i(t) \varphi_i(\lambda),$$

где  $\varphi_i(\lambda)$  – координатные функции ряда;  $a_i(t)$  – проекции сигнала;  $\lambda$  – интервал ретроспективы.

В роли координатных функций могут быть использованы различные функции: гармонические, степенные, ортогональные



полиномы и др. В рассматриваемом далее случае использования степенных функций информационную составляющую сигнала можно представить в виде:

$$(10) x_0(t - \lambda) = \sum_i a_i(t) \lambda^i.$$

В данном случае ряд (10) можно сопоставить с разложением функции  $x_0(t - \lambda)$  в ряд Тейлора в точке  $t$  – текущий момент времени:

$$(11) x_0(t - \lambda) = \sum_i \frac{(-1)^i x_0^{(i)}(t)}{i!} \lambda^i,$$

где  $x_0^{(i)}(t)$  – производные  $i$ -го порядка сигнала  $x_0(t)$

Сравнение (10) и (11) позволяет вывести формулу:

$$(12) x_0^{(i)}(t) = (-1)^i i! a_i(t), \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

Соотношение (12) показывает связь между проекциями информационного сигнала и его производными. Проекции  $a_i(t)$  информационного сигнала определяются согласно [2]. Полученные подобным образом производные могут использоваться для построения обратных динамических операторов.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты обращения передаточной функции вида:

$$(13) W(s) = \frac{e^{-s}}{5s + 1}$$

при помощи степенного экспоненциального фильтра, полученные с использованием моделирующей программы Vissim.

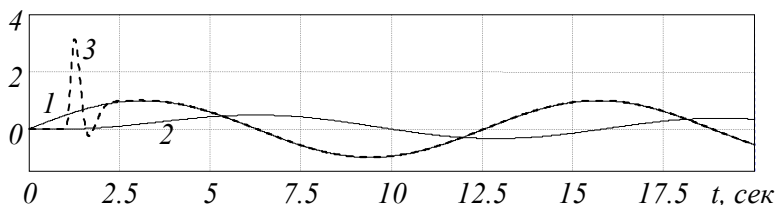


Рис. 3. Пример обращения динамического оператора:

1 – входной сигнал; 2 – сигнал на выходе передаточной функ-

ции;

3 – выходной сигнал, динамически приведенный ко входу

В приведенном на рис. 3 примере обращение динамического оператора (13) реализовано с использованием двух последовательно включенных экспоненциальных фильтров: первый фильтр (3-го порядка) выполняет временной сдвиг входного сигнала, второй фильтр (1-го порядка) осуществляет обращение знаменателя передаточной функции (13).

Таким образом, приведенный выше пример показывает принципиальную возможность использования метода экспоненциальной фильтрации для обращения динамических операторов и упреждающей оценки показателей энергетической эффективности ТП.

#### 4. Пример упреждающего управления системой пароснабжения металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности

Типовая структурная схема системы пароснабжения крупного металлургического предприятия приведена на рис. 4.

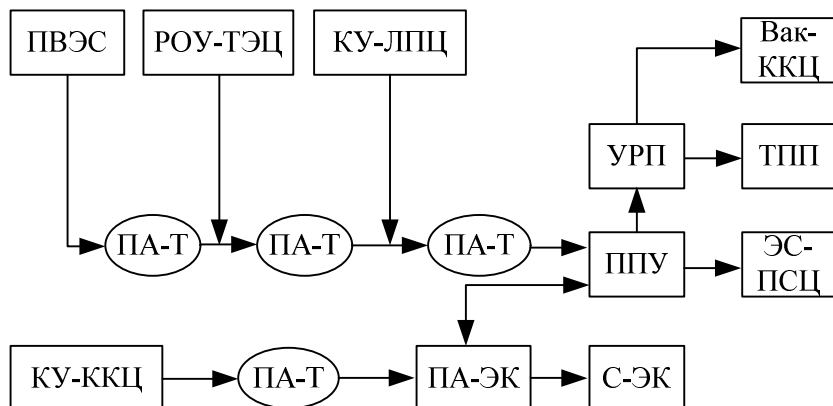


Рис. 4. Типовая структурная схема системы пароснабжения металлургического предприятия

Система пароснабжения на рис. 4 включает в себя:

– источники пара: паровоздушная электростанция (ПВЭС), редуционно-охладительная установка теплоэлектростанции (РОУ-ТЭЦ), паровые котлы утилизаторы нагревательных печей листопрокатного цеха (КУ-ЛПЦ), паровые котлы утилизаторы кислородно-конверторного цеха (КУ-ККЦ);

– потребителей пара: установка вакуумирования стали кислородно-конверторного цеха (Вак-ККЦ), электростанция паросилового цеха (ЭС-ПСЦ), прочие технологические потребители пара (ТПП);

– систему аккумулирования и распределения пара: паровые трубопроводы, обладающие вследствие протяженности собственной аккумулирующей способностью (ПА-Т), пароводяные аккумуляторы энергокорпуса (ПА-ЭК), пароперегревающая установка (ППУ), предохранительная свеча энергокорпуса (С-ЭК), узел распределения пара (УРП),

Задачей энергоэффективного управления рассматриваемой системой пароснабжения является обеспечение номинального режима пароснабжения ЭС-ПСЦ, соответствующего максимальной выработке электроэнергии, а также требуемых параметров пара на Вак-ККЦ и ТПП, при минимизации потерь пара через свечу энергокорпуса. В основе решения данной задачи лежит создание распределенной автоматизированной системы управления (АСУ), формирующей упреждающие управляющие воздействия для систем автоматического регулирования (САР) нижнего уровня в соответствии с заданными критериями управления:

$$(14) \min [D_{ЭС}(t) - D_{ЭС}^0],$$

$$(15) \min [D_{Cв}(t)]$$

при ограничении

$$(16) D_{ВАК}(t) \geq D_{ВАК}^0,$$

где  $D_{ЭС}(t)$ ,  $D_{ЭС}^0$  – фактический и требуемый номинальный расход пара на ЭС-ПСЦ, соответствующий максимальной выработке электроэнергии;  $D_{Cв}(t)$  – расход (потери) пара на свечу в

энергокорпусе;  $D_{\text{ВАК}}(t)$ ,  $D_{\text{ВАК}}^0$  – фактический и минимальный допустимый расход пара на Вак-ККЦ.

На рис. 5 в качестве примера представлена структурная схема потоковой модели рассматриваемой системы пароснабжения. Здесь  $L_i$  – динамические операторы вида (13). Пунктирными линиями показаны вводимые контуры упреждающего управления на основе использования обратных динамических операторов  $L_i^{-1}$ .

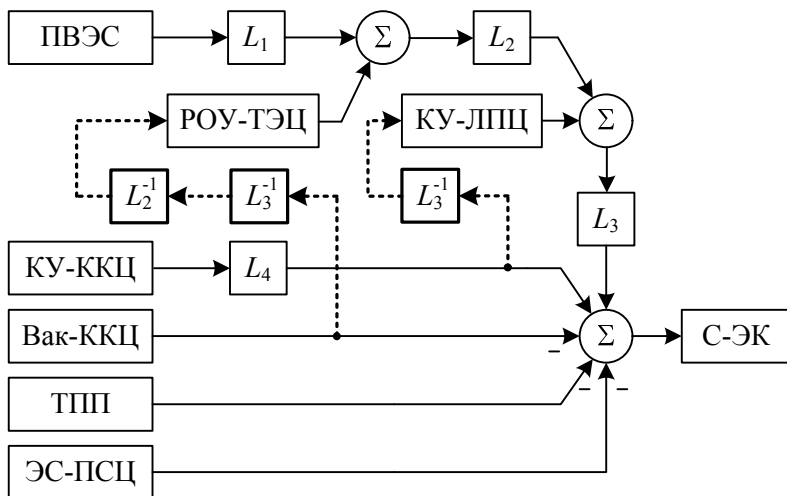


Рис.5. Структурная схема потоковой модели системы пароснабжения с контурами упреждающего управления по возмущениям от КУ-ККЦ и Вак-ККЦ

Результаты моделирования рассматриваемой системы приведены на рис. 6.

Так, на рис. 6,а показаны возмущающие воздействия для АСУ пароснабжения в виде изменений выработки пара КУ-ККЦ и потребления пара Вак-ККЦ. Возмущающие воздействия приняты в виде синусоидальных сигналов, являющихся огибающими реальными процессами в системе.

На рис. 6,б показаны суммарные расходы пара от источников ПВЭС, РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ в исходной системе, обеспечивающей выполнение только технологического критерия управления (14) при ограничении (16) (график 3), и в системе реализующей дополнительно управление по критерию энергетической эффективности (15) (график 4). На рис. 6,в показаны соответствующие расходы (потери) пара на свечу в энергокорпусе для указанных систем.

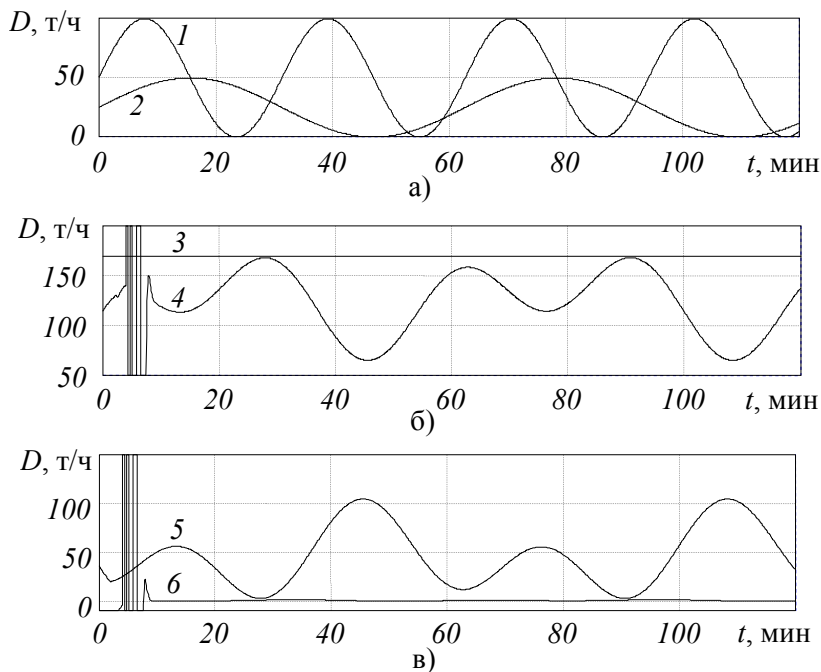


Рис. 6. Результаты моделирования: 1 – выработка пара КУ-ККЦ; 2 – расход пара на Вак-ККЦ; 3, 4 – подача пара от ПВЭС, РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ в исходной системе и системе с упреждающим управлением, соответственно; 5, 6 – потери пара на свечу в исходной системе и системе с упреждающим управлением, соответственно.

Как видно из рис. 6,в, при отсутствии управления по критерию (15) потери пара составляют до 100 т/ч (график 5). Введение упреждающего управления по критерию (15), обеспечивающего изменение подачи пара от источников в зависимости от расходов пара на Вак-ККЦ и КУ-ККЦ, позволяет практически исключить потери пара (график 6).

В рассматриваемом примере вариации расхода пара на Вак-ККЦ демпфируются за счет РОУ-ТЭЦ, а вариации расхода пара на КУ-ККЦ – за счет КУ-ЛПЦ. При этом требуемые значения подачи пара от РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ определяются следующими формулами:

$$(17) D_{РОУ-ТЭЦ}^*(t) = L_2^{-1} \left\{ L_3^{-1} \left\{ D_{Вак-ККЦ}(t) \right\} \right\},$$

$$(18) D_{КУ-ЛПЦ}^*(t) = D_6 - L_3^{-1} \left\{ D_{КУ-ККЦ}(t) \right\},$$

где  $D_6$  – базовое значение требуемой подачи пара от КУ-ЛПЦ, соответствующее среднему значению выработки пара КУ-ККЦ.

Обращение динамических операторов осуществляется на основе применения экспоненциальных фильтров, рассмотренных выше.

Таким образом, в приведенном методическом примере применение упреждающего управления по критерию энергетической эффективности позволило практически устранить потери пара на свечу, составляющие до 100 т/ч, при обеспечении требуемых расходов пара у других потребителей, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности и целесообразности внедрения подобного управления в реальных системах пароснабжения металлургических предприятий.

## 5. Выводы

1. Теплоэнергетические системы металлургических предприятий представляют собой сложные производственные комплексы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумулирования и потребления ТЭР, в значительной степени определяющие энергоемкость и качество выпускаемой продукции. Поэтому важной практической задачей является введение

228

оперативного управления теплоэнергетическими системами металлургического предприятия в рамках АСУ ТП с учетом критериев энергетической эффективности.

2. В статье приводится общая постановка задачи и подход к реализации упреждающего управления теплоэнергетическими системами металлургического производства по критериям энергетической эффективности на основе обращения динамических операторов методом экспоненциальной фильтрации. Приведенные результаты моделирования обращения типового динамического оператора, включающего апериодическое звено и звено чистого запаздывания, показывают принципиальную возможность использования метода экспоненциальной фильтрации для решения подобных задач.

3. На основе разработанного подхода предложена постановка задачи и приведены основные формульные зависимости для реализации упреждающего управления пароснабжением металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности. Результаты моделирования на примере потоковой динамической модели показали высокую эффективность и целесообразность реализации предложенного упреждающего управления в системах пароснабжения металлургического производства.

### **Литература**

1. ГУДВИН Г. К. *Проектирование систем управления* / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребен, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
2. КАЗАРИНОВ Л. С., ГОРЕЛИК С. И. *Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №10. – С. 27-34.
3. КОЛЕСНИКОВ А. А. *Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы* /

- А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, А. А. Кузьменко, М. Е. Погорелов, И. В. Кондратьев. – М.: КомКнига, 2006.
4. ЛИСИЕНКО В. Г. *Хрестоматия энергосбережения*: Справочное издание: в 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелочков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002.
  5. МАТВЕЙКИН В. Г. *Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения* / В. Г. Матвейкин, Д. Ю. Мурромцев. – М.: Машиностроение-1, 2007.
  6. СУЛТАНГУЗИН И. А. *Научно-технические основы моделирования и оптимизации энерготехнологической системы металлургического комбината*: Дис. д-ра техн. наук. – М.: РГБ, 2005. – 414 с.

## **ENERGY EFFICIENCY CRITERION FEEDFORWARD CONTROL OF HEAT-AND-POWER ENGINEERING SYSTEMS IN METALLURGICAL PRODUCTION**

**Dmitry Shnayder**, South Ural State University, Chelyabinsk, Cand.Sc., assistant professor (shnayder@ait.susu.ac.ru).

*Abstract: The problem is set of energy efficiency criterion feedforward control of heat-and-power engineering systems in metallurgical production. The suggested problem solution approach uses exponential filtration method based on dynamic estimations of energy efficiency parameters. The article contains an example of energy efficiency criterion feedforward control of a steam supply system in a metallurgical plant.*

Keywords: energy efficiency, feedforward control, heat-and-power engineering system.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко*