

УДК 681.513.54, 681.518, 621.18-5
ББК 32.965, 31.391

МЕТОД УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ПО КРИТЕРИЯМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Шнайдер Д. А.¹, Казаринов Л. С.²

(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск)

Предложен метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности на основе моделей обратной динамики. Предложен подход к построению обратных моделей динамики технологических объектов управления в условиях помех с использованием метода экспоненциальной фильтрации. Приведен пример построения адаптивной системы регулирования подачи воздуха в паровой котел по критерию максимума КПД процессов горения.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, упреждающее управление, экспоненциальная фильтрация, паровой котел.

1. Введение

Существующие теории и практика управления большими технологическими комплексами используют, как правило, методы централизованного диспетчерского управления в сочетании с локальными автоматическими регуляторами технологических

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

² Лев Сергеевич Казаринов, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления (kazarinov@ait.susu.ac.ru).

параметров. При этом обеспечение качества и эффективности управления требует получения достоверной прогнозной информации о состоянии системы, позволяющей формировать оперативные управляющие воздействия в соответствии с заданными критериями управления. Решение данной задачи основано на создании автоматизированных систем управления на базе различных подходов, в том числе прогнозирующих моделей технологических объектов управления (ТОУ), описывающих динамику выработки, аккумулирования и потребления ресурсов.

Проблема построения систем автоматической оптимизации была впервые рассмотрена В.В. Казакевичем [1]. С этого времени появилось большое количество работ, посвященных исследованию и построению различных типов подобных систем [5, 8, 11, 12]. Современные подходы к решению задач рассматриваемого класса основываются на использовании методов прогнозирующего управления. Обзор существующих практических разработок систем оптимизации на основе прогнозирующего управления содержится в работе [13].

В настоящее время актуальной задачей является построение управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности [10]. При построении подобных систем управления критическим вопросом является вычисление оценок критериев эффективности технологического процесса в реальном времени. Подобные критерии представляют собой двухсторонние оценочные соотношения, где одна сторона отношения – объемы производимой продукции, другая – объемы потребляемых ресурсов. Однако построение точных прогнозирующих моделей для сложных технологических комплексов является весьма объемной и трудно решаемой задачей. Реально во многих случаях подобные модели обладают недостаточной точностью оценки показателей эффективности, требуемой в соответствии с технологическими регламентами. Поэтому применение известных методов управления, основанных на построении точных прогнозирующих моделей ТОУ, для эффективного управления сложными технологическими процессами имеет определенные ограничения.

В этой связи актуальной проблемой является разработка подхода к управлению, который основывается на упреждающих оценках эффективности процессов, получаемых не на прогнозирующих моделях, заданных на основе ранее проведенных исследований, а исходя из непосредственных измерений двух сторон оценочного отношения: текущих расходов энергетических ресурсов, объемов выходной продукции, а также статистики отказов и аварийных ситуаций. Построение подобных оценок приводит к нетривиальным задачам, так как их решение должно существенно базироваться на комбинированных моделях прямой и обратной динамики управляемых процессов. При этом сам принцип управления, основанный на упреждающих оценках эффективности использования ресурсов до того, как эти ресурсы будут реально использованы или исчерпаны, является естественным условием достижения функциональной и эксплуатационной эффективности в сложных технологических комплексах.

Поиску и реализации новых эффективных подходов и решений к энергосберегающему управлению сложными производственными процессами и системами посвящены работы [6, 7, 9]. Однако методы упреждающего управления сложными технологическими процессами по критериям энергетической эффективности в настоящее время еще недостаточно разработаны, что и определяет актуальность данной работы.

2. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по показателям энергетической эффективности на основе моделей обратной динамики

Задачи оперативного управления сложными технологическими комплексами по технико-экономическим показателям в настоящее время, как правило, решаются на основе текущих или прогнозных оценок показателей, которые вычисляются на моделях управляемых процессов. Однако во многих случаях задачи оперативного оценивания технико-экономических показателей оказываются некорректно поставленными и статистически смещенными.

Примером может служить прямая оперативная оценка удельного показателя энергоемкости продукции

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

где $P(t)$ – текущий объем производимой продукции; $W(t)$ – текущий объем потребляемых энергетических ресурсов (ЭР).

Задача (1) является некорректно поставленной, так как текущий импульс энергии $W(t)$ вследствие существующего технологического запаздывания расходуется не на выпуск текущего объема продукции $P(t)$, а на будущий выпуск $P(t + \tau_3)$. В динамически выраженных случаях оценка (1) будет иметь произвольный характер и не отражать текущую энергоемкость процесса.

Более корректной оценкой является оценка [1]

$$(2) \quad a(t) = \frac{P(t)}{W(t - \tau_3)},$$

где τ_3 – запаздывание технологического процесса.

Однако оценка (2) неэффективна в управлении, так как импульс ЭР $W(t - \tau_3)$ уже израсходован. Такая оценка является ретроспективной.

Прогнозирующая оценка [3]

$$(3) \quad a(t) = \frac{P(t + \tau_3)}{W(t)}$$

более эффективна в управлении, но она основана на предельном упрощении модели ТП, сведении его к звену запаздывания.

Статистическая оценка

$$(4) \quad a_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{ср}}}{W_{\text{ср}}}$$

является корректной, но не отражает динамики процесса, поэтому не является оперативной.

Другой пример – вычисление оценок эффективности в существующих моделях прогнозирующего управления.

На рис. 1 $\Phi_{\text{дин}}$ – динамическая модель ТП. В этом случае оценка удельного показателя энергоемкости будет иметь вид

$$(5) \quad a(t) = \frac{P^{пр}(t)}{W(t)},$$

где $P^{пр}(t)$ – прогнозирующая оценка, рассчитанная при помощи модели $\Phi_{дин}$; $W(t)$ – измеренный объем потребления ЭР.

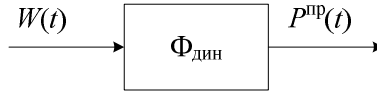


Рис. 1. Вычисление прогнозного значения выпуска продукции на основе динамической модели технологического процесса (ТП)

Подобная оценка является смещенной, так как в оценке $P^{пр}(t)$ содержится методическая ошибка, обусловленная неточностью построенной модели процесса. Для сложных процессов построить точные модели затруднительно, поэтому методическая ошибка здесь может быть велика.

В рассмотренных случаях постановки задач оперативной оценки технико-экономических показателей являются некорректными. Это приводит к большим вариациям значений показателей в зависимости от ошибок измерений и моделирования. Все это снижает устойчивость и качество оперативного управления ТП.

В работе предлагается новый подход к построению упреждающего управления в АСУ ТП, основанный на использовании статистически несмещенных корректных оценок динамики технико-экономических показателей технологических процессов.

Рассматриваемая структура АСУ ТП имеет следующий обобщенный вид (рис. 2).

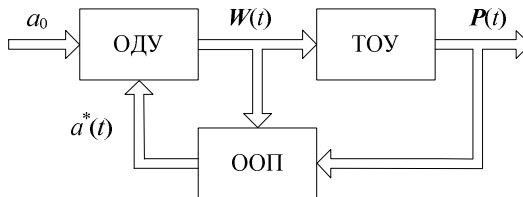


Рис. 2. Структура АСУ ТП с контуром упреждающего управления по показателям энергетической эффективности

На рис. 2 ОДУ – оперативно-диспетчерское управление; ТОУ – технологический объект управления, включая локальные системы управления; ООП – оперативная оценка удельных показателей энергоемкости $a^*(t)$; a_0 – заданное значение удельных показателей энергоемкости.

Вычисление статистически несмещенных корректных оценок динамики технико-экономических показателей в блоке ООП основывается на следующих принципах:

- 1) двухканального измерения динамики удельных технико-экономических показателей;
- 2) обеспечения статистической инвариантности оценок к методическим ошибкам построения моделей процессов;
- 3) обеспечения динамической синхронизации компонент, составляющих оперативные оценки удельных технико-экономических показателей.

В работе предлагается следующая структура вычисления оперативной упреждающей оценки энергоемкости технологического процесса (рис. 3).

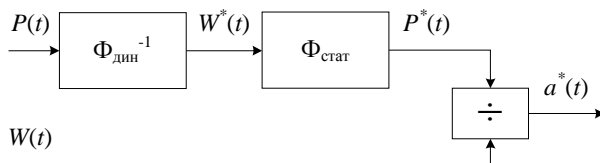


Рис. 3. Структура вычисления оперативной упреждающей оценки энергоемкости технологического процесса

Здесь: $\Phi_{\text{дин}}$ – динамическая модель ТП; $\Phi_{\text{стат}}$ – статическая модель ТП; $P^*(t)$ – упреждающая оценка объема выпуска продукции.

Для структуры оценки (рис. 3) выполнены указанные выше принципы корректного построения несмещенных оценок динамики удельных технико-экономических показателей вида

$$(6) \quad a^*(t) = \frac{P^*(t)}{W(t)},$$

а именно:

- 1) оценка производится на основе двухканальных измерений;
- 2) данная оценка является статистически несмещенной, так как в статике выполняется условие инвариантности

$$(7) \quad \Phi_{\text{стат}} \Phi_{\text{дин}}^{-1} = I,$$

где I – единичный оператор.

В результате в статике формула оценки становится типовой, принятой в практике технико-экономических показателей

$$(8) \quad a = \frac{P}{W}$$

и не зависит от ошибки модели;

- 3) в динамике процессы $W^*(t)$ и $P^*(t)$ являются синхронизированными, так как связаны безынерционной связью $\Phi_{\text{стат}}$. Так как $W^*(t)$ в пределах точности модели отражает $W(t)$, то $P^*(t)$ также оказывается синхронизированным с $W(t)$ в пределах точности модели. Синхронизация в указанном выше смысле величин $P^*(t)$ и $W(t)$ приводит к корректной постановке задачи оценивания.

Например, для простейшей модели ТП:

$$(9) \quad \Phi_{\text{дин}} : P(t) = \Phi_{\text{стат}} W(t - t_3)$$

синхронизированная оценка будет иметь вид

$$(10) \quad a^*(t) = \frac{\Phi_{\text{стат}} [\Phi_{\text{стат}} W(t - t_3)]^{-1}}{W(t)} = \frac{P(t + t_3)}{W(t)}.$$

Из (10) видно, что оценка $a(t)$ является упреждающей и корректно вычисляемой.

Преимущества использования упреждающих оценок технико-экономических показателей технологических процессов, статистически инвариантных к ошибкам моделей, состоят в следующем:

- 1) оперативное управления процессом ведется не только по текущим значениям технико-экономических показателей, но и упреждающим оценкам показателей, что повышает качество оперативного управления;

- 2) расширяются возможности использования моделей ТП в задачах ОДУ. Для сложных систем здесь достаточно использовать упрощенные макромоделли, что снижает сложность реали-

зации упреждающего управления, делает его практически реализуемым для сложных ТОУ.

3. Построение обратных моделей динамики технологических процессов в условиях помех на основе экспоненциальной фильтрации

Рассматриваемый подход к построению упреждающего управления существенно базируется на построении обратных моделей динамики ТП. Рассмотрим решение данной задачи с использованием методов экспоненциальной фильтрации.

Математически построение обратных моделей динамики ТП сводится к решению операторного уравнения

$$(11) \Phi(W_t) = P_{t,0},$$

где $P_{t,0}$ – заданная реализация процесса $P(t)$; W_t – искомая реализация процесса $W(t)$.

Данная задача является некорректно поставленной. Регуляризованное решение поставленной задачи может быть выполнено с использованием обратных моделей динамики, построенных на основе методов экспоненциальной фильтрации.

Пусть оператор ТП задан в дробно-рациональном виде со звеном запаздывания:

$$(12) L_0(p) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j p^j}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} e^{-pt_3}, \quad m < n.$$

Формальное обращение оператора

$$(13) L_0^{-1}(p) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i p^i}{\sum_{j=0}^m b_j p^j} e^{pt_3}.$$

Структурная схема обратного оператора представлена на рис. 4.

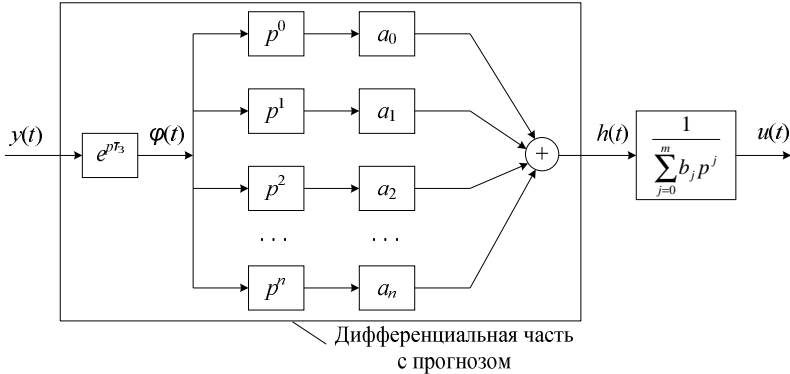


Рис. 4. Формальная структурная схема обратного оператора

В работе решена задача построения дифференциальной части с прогнозом, входящей в состав обратного оператора, на фоне помех.

Решение базируется на разложении сигнала $y(t)$ в полиномиальном базисе

$$(14) \quad y(t - I) \approx \sum_{i=0}^n g_i(t) I^i,$$

где λ – интервал ретроспективы; $g_i(t)$ – спектральные составляющие разложения.

На основе метода экспоненциальной фильтрации [2] был определен выход дифференциальной части фильтра с прогнозом:

$$(15) \quad h(t) \approx \sum_{i=0}^n (-1)^i g_i(t) \sum_{k=0}^i k! c_k a_k t_3^{i-k},$$

где c_k – биномиальные коэффициенты.

В результате получена структура обратного оператора, приведенная на рис. 5.

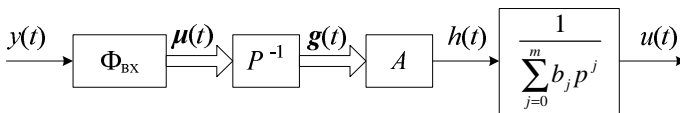


Рис. 5. Структурная схема обратного оператора

На рис. 5 $\Phi_{\text{вх}}$ – формирующий фильтр моментов входного сигнала; P^{-1} – обратная матрица корреляционных коэффициентов; A – матрица коэффициентов дифференциальной части обратного оператора; $\mu(t) = (\mu_0(t), \mu_1(t), \dots, \mu_n(t))^T$ – вектор моментов входного сигнала; $g(t)$ – вектор координатных функций разложения.

Рассмотрим в общем случае задачу реализации обратного оператора на фоне шума.

В случае белого шума данная задача сводится к нахождению безусловного минимума функционала Лагранжа

$$(16) D_0 - \sum_{i=0}^n 2g_i \int_0^{\infty} t^i w(t) e^{-ct} dt ,$$

где γ_i – неопределенные множители Лагранжа; D_0 – дисперсия сигнала на выходе фильтра при действии белого шума.

Оптимальная весовая функция определяется уравнением

$$(17) w(t) = \sum_{i=0}^n g_i t_i e^{-ct} ,$$

где γ_i определяются из условий:

$$(18) \int_0^{\infty} I^i w(I) dI = \sum_{k=0}^i (-1)^i k! c_k a_k t_3^{i-k} .$$

На фоне «цветных» помех дисперсия (центрированный случайный процесс с гауссовским распределением) на выходе фильтра определяется функционалом

$$(19) D_z = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K_z(t-l) w(t) w(l) dt dl .$$

Здесь $K_z(\tau)$ – корреляционная функция «цветного» шума.

Заметим, что корреляционной функции $K_z(\tau)$ в частотной области соответствует частотный спектр шума $S_z(\omega)$, который образуется на основе прохождения белого шума через формирующий фильтр с передаточной функцией $F(s)$:

$$(20) S_z(\omega) = F^*(j\omega)F(j\omega) .$$

Для «цветного» шума постановка задачи нахождения оптимальной весовой функции динамического звена сводится к нахождению минимума функционала

$$(21) (1-a)D_z + aD_0 - \sum_{i=0}^n 2g_i \int_0^{\infty} t^i w(t) e^{-ct} dt, \quad 0 \leq a \leq 1.$$

где α – интенсивность фона белого шума, который вводится для регуляризации постановки задачи. При $\alpha = 1$ задача минимизации функционала (21) совпадает с предыдущей. При $\alpha = 0$ задача минимизации функционала (21) является некорректно поставленной. В этом случае малым отклонениям в исходных данных могут соответствовать большие отклонения в решении. Выбор значения параметра регуляризации α необходимо осуществлять на основе компромисса между точностью и устойчивостью решения.

В целом задача минимизации функционала (21) соответствует постановке задачи оптимальной фильтрации по Винеру. Решением задачи является оптимальная передаточная функция фильтра, удовлетворяющая условию физической осуществимости:

$$(22) W(s) = \frac{\sum_{i=0}^n g_i c \Phi_i(-c+s)}{(1-a)F(s) + a}.$$

где неопределенные множители Лагранжа γ_i определяются из условий (18).

На системном уровне АСУ ТП рассмотренные упреждающие оценки динамики технико-экономических показателей могут быть использованы в оперативно-диспетчерском управлении и в автоматических системах экстремального регулирования.

В случае оперативного управления на экран диспетчера выводятся текущие значения технико-экономических показателей ТП, их упреждающие оценки, а также кумулятивная оценка экономии ресурсов, полученная в результате упреждающего управления.

В автоматических системах экстремального регулирования упреждающие оценки рекомендуется использовать в качестве критериев оптимизации технологических процессов в нестационарных режимах.

4. Пример построения адаптивной системы регулирования подачи воздуха в паровой котел по критерию максимума КПД процессов горения

Топочные процессы в энергетических котлах, работающих в составе сложных технологических комплексов, находятся под воздействием дестабилизирующих факторов, среди которых наибольшее значение имеют:

- изменения давления и калорийности топливных газов (например, для металлургического производства – доменного и коксового газа);
- колебания задающих воздействий по выработке тепловой энергии, определяемые технологическими режимами основного производства.

Нестабильность параметров режимов топочных процессов обуславливает снижение КПД котлов. Компенсировать влияние дестабилизирующих факторов можно на основе адаптивной коррекции карт рабочих режимов, проводимой как в режиме автоматического регулирования, так и в оперативном режиме. Коррекция заключается в вычислении сигнала коррекции подачи воздуха в топку, исходя из текущих значений параметров топочных процессов. Целью коррекции подачи воздуха является достижение максимального КПД топочных процессов.

Общая схема предлагаемой системы управления паровым барабанным котлом приведена на рис. 6.

На рис. 6: *I* – контур регулирования давления в магистрали; *II* – контур регулирования по тепловой нагрузке котла; *III* – контур регулирования подачи воздуха по содержанию кислорода в уходящих газах; *IV* – контур автоматической оптимизации подачи воздуха по критерию максимума КПД топочных процессов; p_m – давление пара в магистрали; p_{m0} – уставка давления пара в магистрали; Δp_m – сигнал рассогласования по давлению; $W_{тр}(p)$ – передаточная функция главного регулятора; $u_{тр}$ – управляющее воздействие по давлению пара от главного регулятора; d_i – доля нагрузки i -ой котельной установки, задаваемая главным регулятором; ЗРУ – задатчик ручного управления; $Q'_{т0}$ – задание

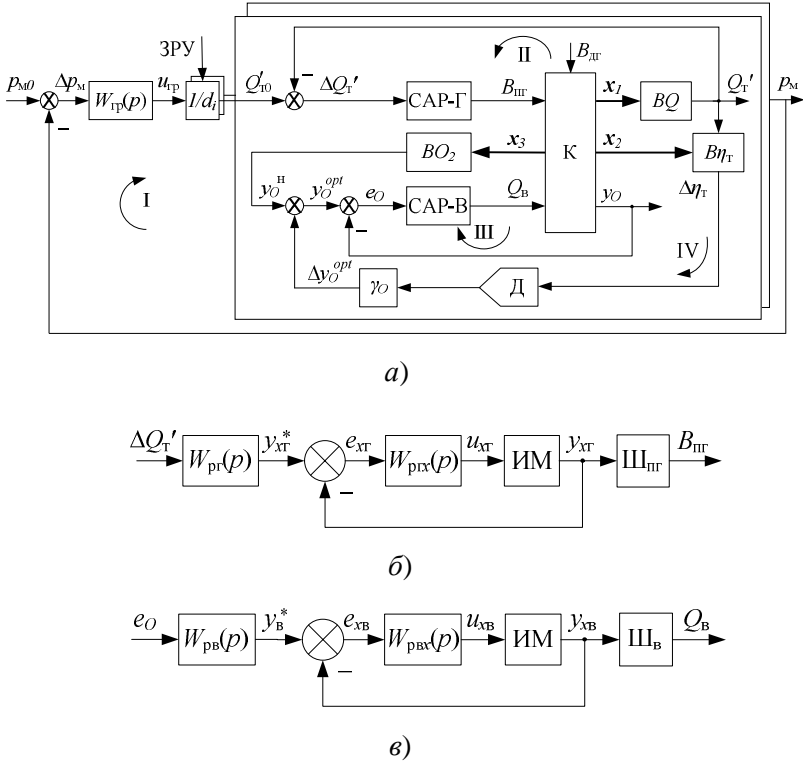


Рис. 6. Общая схема системы автоматического регулирования парового барабанного котла, работающего на смеси газов

нагрузки котла от главного регулятора; Q'_T – тепловыделение в топке; $\Delta Q'_T$ – сигнал ошибки по нагрузке; $CAP-\Gamma$ – система автоматического регулирования подачи природного газа (рис. 12, б); $B_{пр}$ – расход природного газа; $B_{др}$ – расход доменного газа; y_O , y_O^H – текущее и номинальное содержание кислорода в дымовых газах, соответственно; Δy_O^{opt} – сигнал коррекции номинального содержания кислорода по критерию максимума КПД топочных процессов; y_O^{opt} – оптимальное процентное содержание кислорода в дымовых газах; e_O – сигнал ошибки по содер-

жанию кислорода; САР-В – система автоматического регулирования подачи воздуха (рис. 12, в); Q_B – расход воздуха; $x_1 = \{p_6, D_6, h'', h_{в.э.}'', W_{п.в.}\}$, $x_2 = \{B_{пг}, B_{дг}, Q_H^{пг}, Q_H^{дг}, P_B\}$, $x_3 = \{D_{пг}, B_{пг}, B_{дг}\}$ – векторы режимных параметров, где p_6 – давление в барабане котла; D_6 – паропроизводительность барабана; h'' – энтальпия пара в барабане; $h_{в.э.}''$ – энтальпия воды водяного экономайзера; $W_{п.в.}$ – расход питательной воды; $D_{пг}$ – выработка перегретого пара; $Q_H^{пг}$ – калорийность природного газа; $Q_H^{дг}$ – калорийность доменного газа; P_B – давление воздуха после воздухоподогревателя; BQ – вычислитель сигнала Q_T ; BO_2 – вычислитель сигнала O_2^H ; Bh – вычислитель приращения КПД $\Delta\eta_T$ при изменении подачи воздуха; γ_O – коэффициент, определяющий скорость адаптации системы автоматического регулирования по критерию максимума КПД, D – дискретный интегратор, вычисляющий оптимальную коррекцию Δy_O^{opt} задающего воздействия y_O^H по критерию максимума КПД; $W_{рг}(p)$, $W_{рв}(p)$ – передаточные функции регуляторов подачи природного газа и воздуха соответственно; $y_{хг}^*$, $y_{хв}^*$ – задания положений исполнительных механизмов (ИМ) шиберов (Ш) природного газа и воздуха соответственно; $e_{хг}$, $e_{хв}$ – сигналы ошибки по положению ИМ природного газа и воздуха соответственно; $W_{ргх}(p)$, $W_{рвх}(p)$ – передаточные функции регуляторов положения ИМ подачи природного газа и воздуха соответственно; $u_{хг}$, $u_{хв}$ – управляющие воздействия по положению шиберов природного газа и воздуха соответственно.

Вычисление сигнала Q_T' осуществляется на основе обратной модели динамики циркуляционного контура котла [4]:

$$(23) \quad Q_T' = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{dp_6}{dt} + (D_6 \cdot h'' - W_{п.в.} \cdot h_{в.э.}'') - A_2 \cdot (D_6 - W_{п.в.}).$$

Вычисление производной в формуле (23) осуществляется при помощи метода экспоненциальной фильтрации, рассмотренного ранее.

В процессе функционирования котельного агрегата параметры топливных газов могут изменяться. Особо это относится к параметрам доменного газа, давление которого и калорийность могут изменяться в широких пределах. В этих условиях режим работы котельного агрегата может значительно отличаться от оптимального режима, соответствующего максимальному КПД котла. Для обеспечения оптимального режима работы котельного агрегата целесообразно использовать экстремальную настройку системы автоматического регулирования по критерию максимума КПД котла.

Текущий поток тепловой энергии вычисляется по формуле:

$$(24) Q_{\text{вх}}(t) = B_{\text{пр}}(t) \cdot Q_{\text{н}}^{\text{пр}}(t) + B_{\text{др}}(t) \cdot Q_{\text{н}}^{\text{др}}(t).$$

На практике калорийность природного газа относительно постоянна, калорийность доменного газа представляет собой случайный процесс, который будем характеризовать математическим ожиданием $Q_{\text{н}0}^{\text{др}}$ и среднеквадратическим отклонением

(СКО) $S_{\text{н}}^{\text{др}}$. В этих условиях текущий поток тепловой энергии (24) может быть представлен в виде случайного процесса:

$$(25) Q_{\text{вх}}'(t) = B_{\text{пр}}(t) \cdot Q_{\text{н}}^{\text{пр}}(t) + B_{\text{др}}(t) \cdot Q_{\text{н}0}^{\text{др}}(t) + B_{\text{др}}(t) \cdot z(t),$$

где $z(t)$ – центрированная случайная величина.

Тепловыделение в топке определяется по формуле (23). Текущее значение КПД можно оценить на основе соотношения

$$(26) h_{\text{т}}(t) = \frac{Q_{\text{т}}'(t)}{Q_{\text{вх}}(t - \tau_3(t))},$$

где $\tau_3(t)$ – запаздывание, определяемое по решению экстремальной задачи

$$(27) \tau_3(t) = \arg \max_{\{t_3\}} \{M_t(\Delta Q_{\text{вх}}(t - t_3) \Delta Q_{\text{т}}'(t))\}.$$

Смысл экстремальной задачи состоит в том, что на ее основе по параметру τ_3 в каждый момент времени t определяется максимум коэффициента корреляции между отклонениями $\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau_3)$, $\Delta Q_{\text{т}}'(t)$ от средних значений. Оператор $M_t(\cdot)$ – оператор текущего усреднения.

Зная текущее значение КПД (26), можно оценить степени влияния действующих режимных факторов на отклонения КПД

($\Delta\eta_T$) от среднего значения. Для решения задач настройки системы регулирования при оценке текущего КПД используется линеаризация:

$$(28) \quad h_T(t) = h_{T, \text{cp}}(t) + \Delta h_T,$$

где среднее значение КПД определяется формулами:

$$(29) \quad h_{T, \text{cp}}(t) = \frac{Q'_{T, \text{cp}}(t)}{Q_{\text{вх}, \text{cp}}(t)},$$

$$(30) \quad Q'_{T, \text{cp}}(t) = M_t \{Q'_T(t)\},$$

$$(31) \quad Q_{\text{вх}, \text{cp}}(t) = M_t \{Q_{\text{вх}}(t)\}.$$

Влияние режимных факторов оценивается на основе упреждающего соотношения

$$(32) \quad \Delta h_T = a_1(t) \cdot \Delta Q_{\text{вх}}(t - (t_3 - \Delta t_y)) + a_2(t) \cdot \Delta P_{\text{в}}(t - (t_3 - \Delta t_y)),$$

где

$$(33) \quad a_1(t) = \frac{\partial h_T}{\partial Q_{\text{вх}}(t - (t_3 - \Delta t_y))}, \quad a_2(t) = \frac{\partial h_T}{\partial P_{\text{в}}(t - (t_3 - \Delta t_y))}.$$

Здесь $\Delta Q_{\text{вх}}(t)$, $\Delta P_{\text{в}}(t)$ – соответственно отклонение входного теплового потока и давления воздуха от среднего значения; Δt_y – интервал упреждения.

Определение коэффициентов влияния $a_1(t)$, $a_2(t)$ находится на основе решения задачи оценки неизвестных коэффициентов зависимости (32) по критерию минимума среднеквадратической ошибки с учетом случайного характера объемов подачи и калорийности доменного газа.

Коэффициенты влияния отклонения подачи топлива и подачи воздуха на КПД котла служат индикаторами оптимальности процесса горения в топке котла.

Применение адаптивной системы автоматического регулирования нагрузки котлов и подачи воздуха, использующей упреждающие оценки, позволяет осуществлять в следящем режиме оптимизацию топочных процессов по критерию максимума КПД (брутто) при возмущающих колебаниях параметров доменного газа. Реализация на практике адаптивной системы на

котле ст. №5 ЦЭС ОАО «ММК» позволила повысить КПД до 2–4% в зависимости от параметров режимов.

5. Выводы

1. Перспективным подходом, позволяющим повысить эффективность автоматизированного управления сложными технологическими процессами, является введение упреждающего управления по критериям энергетической эффективности и реализация на его основе соответствующих систем автоматизированного управления.

2. В работе предложен метод упреждающего управления сложными технологическими процессами по критериям энергетической эффективности на основе использования комбинированных моделей прямой и обратной динамики ТОО.

3. Предложен подход к обращению динамических операторов с использованием метода экспоненциальной фильтрации. Рассмотрена в общем случае задача реализации обратного оператора на фоне помех.

4. Приведен пример построения адаптивной системы регулирования подачи воздуха в паровой котел по критерию максимума КПД процессов горения.

Литература

1. КАЗАКЕВИЧ В.В. *Об экстремальном регулировании*. Дис. канд. техн. наук. МВТУ, 1944. – В кн. *Автоматическое управление и вычислительная техника*. – М.: Машиностроение, 1964. – Вып. 6. – С. 7–53.
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. КАЗАРИНОВ Л.С., ШНАЙДЕР Д.А. *Метод построения упреждающих оценок энергетической эффективности технологических процессов* // Вестник ЮУрГУ. Серия

- «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 12, №22 (198). – С. 57–62.
4. КАЗАРИНОВ Л.С., ШНАЙДЕР Д.А., КИНАШ А.В., КОЛЕСНИКОВА О.В. *Корреляционно-экстремальная система управления энергетической эффективностью паровых котлов* // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11, №2 (178). – С. 81–85.
 5. КРАСОВСКИЙ А.А. *Динамика непрерывных самонастраивающихся систем*. – М.: Физматгиз, 1963. – 313 с.
 6. КРУТЬКО П.Д. *Обратные задачи динамики в теории автоматического управления*. Цикл лекций: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
 7. МАТВЕЙКИН В.Г., МУРОМЦЕВ Д.Ю. *Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения*: Монография. – М.: Машиностроение, 2007.
 8. РАСТРИГИН Л.А. *Системы экстремального управления*. – М.: Наука, 1974. – 632 с.
 9. СУЛТАНГУЗИН И.А. *Научно-технические основы моделирования и оптимизации энерготехнологической системы металлургического комбината*: Дис. д-ра техн. наук. – М.: РГБ, 2005. – 414 с.
 10. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
 11. ФЕЛЬДБАУМ А.А. *Основы теории оптимальных автоматических систем*. – М.: Наука, 1966.
 12. ЦЫПКИН Я.З. *Адаптация и обучение в автоматических системах*. – М. Наука, 1968. – 400 с.
 13. Qin S.J., Badgwell T.A. *A survey of industrial model predictive control technology* // Control Engineering Practice. – 2003. – №11. – P. 733–764.

**ENERGY EFFICIENT PREDICTIVE CONTROL OF
COMPLEX MANUFACTURING PROCESSES**

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

Lev Kazarinov, South Ural State University, Chelyabinsk, Doctor of
Science, professor (kazarinov@ait.susu.ac.ru).

Abstract: The method of energy efficient predictive control for complex manufacturing processes is considered. The algorithm for real time evaluation of process efficiency using exponential filtration is proposed. An application for energy efficient predictive control of a steam generator is discussed.

Keywords: energy efficiency, predictive control, exponential filtration, steam generator.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Н. Н. Бахтадзе*