

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

*(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск)*

В статье 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 Шнайдер Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления (shnayder@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 т.ч. 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 [2-5]. 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 [6].

В настоящее время актуальной задачей является построение управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности [7]. 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 сторона – 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 [8-10]. Однако методы упреждающего управления сложными технологическими процессами по критериям энергетической эффективности в настоящее время еще разработаны недостаточно, 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 моде-

лях 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 [11]

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

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

Статистическая оценка

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

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

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

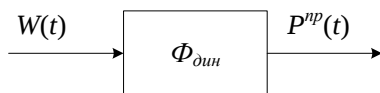


Рис. 1. Вычисление прогнозного значения выпуска продукции на основе динамической модели технологического процесса (ТП)

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

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

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

Подобная оценка является смещенной, так как в оценке $P^{np}(t)$ 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).

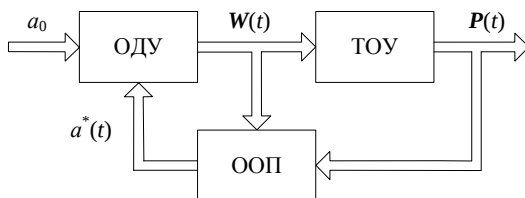


Рис. 2. Структура АСУ ТП с контуром упреждающего управления по показателям энергетической эффективности

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) обеспечение статистической инвариантности оценок к методическим ошибкам построения моделей процессов;
- 3) обеспечение динамической синхронизации компонент, составляющих оперативные оценки удельных технико-экономических показателей.

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

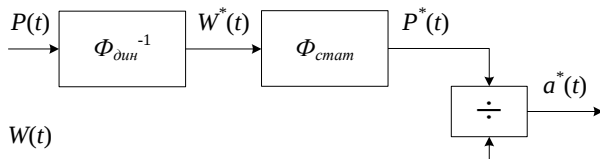


Рис. 3. Структура вычисления оперативной упреждающей оценки энергоемкости технологического процесса

Здесь: $\Phi_{дин}$ – динамическая модель ТП; $\Phi_{стат}$ – 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

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

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 $\Phi_{стат}$. 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:

$$(9) \quad \Phi_{дин} : P(t) = \Phi_{стат} W(t - \tau_3)$$

синхронизированная оценка будет иметь вид

$$(10) \quad a^*(t) = \frac{\Phi_{стат} [\Phi_{стат} W(t - \tau_3)]^{-1}}{W(t)} = \frac{P(t + \tau_3)}{W(t)}$$

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 реализации 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:

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

Формальное обращение оператора

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

Структурная схема обратного оператора представлена на рис. 4.

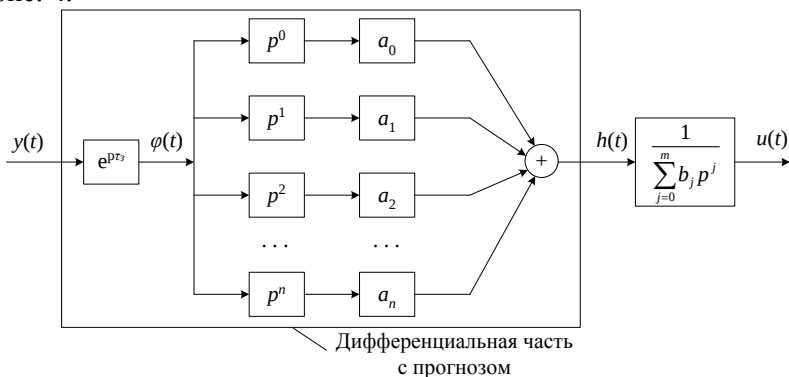


Рис. 4. Формальная структурная схема обратного оператора

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

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

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

На основе метода экспоненциальной фильтрации [12] был определен выход дифференциальной части фильтра с прогнозом:

$$(15) \quad h(t) \approx \sum_{i=0}^n (-1)^i g_i(t) \sum_{k=0}^i k! c_k a_k \tau_3^{i-k},$$

где c_k – биномиальные коэффициенты.

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

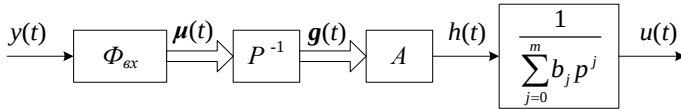


Рис. 5. Структурная схема обратного оператора

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 шумов.

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

$$(16) \quad D_0 - \sum_{i=0}^n 2\gamma_i \int_0^{\infty} \tau^i w(\tau) e^{-c\tau} d\tau,$$

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

Оптимальная весовая функция определяется уравнением

$$(17) \quad w(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau},$$

где γ_i определяются из условий:

$$(18) \quad \int_0^{\infty} \lambda^i w(\lambda) d\lambda = \sum_{k=0}^i (-1)^k k! c_k a_k \tau_3^{i-k}.$$

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

$$(19) D_z = \int_0^\infty \int_0^\infty K_z(\tau - \lambda) w(\tau) w(\lambda) d\tau d\lambda,$$

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

$$(21) (1 - \alpha)D_z + \alpha D_0 - \sum_{i=0}^n 2\gamma_i \int_0^\infty \tau^i w(\tau) e^{-c\tau} d\tau, \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

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:

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

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 системы управления паровым барабанным котлом приведена на рис. 6 [13].

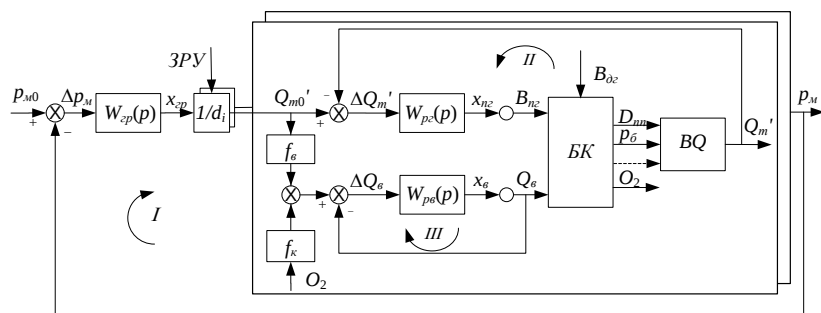


Рис. 6. Общая схема системы автоматического регулирования парового барабанного котла, работающего на смеси газов

На рис. 6: p_m – давление пара в магистрали; p_{m0} – уставка давления пара в магистрали; Δp_m – сигнал рассогласования по давлению; Q_{m0}' – задание нагрузки котла от главного регулятора; Q_m' – тепловыделение в топке; $\Delta Q_m'$ – сигнал ошибки по нагрузке; B_{nz} – расход природного газа; B_{dz} – расход доменного газа; Q_a – расход воздуха; x_{nz} – управляющее воздействие по природному газу от регулятора природного газа; x_a – управляющее воздействие по воздуху; x_{sp} – управляющее воздействие от главного регулятора; d_i – доля нагрузки i -ой котельной установки, задаваемая главным регулятором; I – контур регулирования давления по магистрали; II – контур регулирования по тепловой нагрузке котла; III – контур регулирования по воздуху; ЗРУ – задатчик ручного управления; $W_{pc}(p)$ – передаточная функция регулирования подачи природного газа; f_a – функция задания воздуха; f_k – функция коррекции по содержанию кислорода;

$W_{pв}(p)$ – передаточная функция регулирования воздуха; $W_{cp}(p)$ – передаточная функция главного регулятора; BQ – вычислитель сигнала Q_m' .

Вычисление сигнала Q_m' осуществляется на основе обратной модели динамики циркуляционного контура котла:

$$(23) \quad Q_m' = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{dp_{\delta}}{dt} + (D_{\delta} \cdot h'' - W_{н.в.} \cdot h_{в.э.}') - A_2 \cdot (D_{\delta} - W_{н.в.})$$

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:

$$(24) \quad Q_{ex}(t) = B_{нз}(t) \cdot Q_{н}^{нз}(t) + B_{\delta z}(t) \cdot Q_{н}^{\delta z}(t),$$

где $B_{нз}(t)$ – расход природного газа; $B_{\delta z}(t)$ – расход доменного газа; $Q_{н}^{нз}(t)$ – калорийность природного газа; $Q_{н}^{\delta z}(t)$ – калорийность доменного газа.

На практике калорийность природного газа относительно постоянна, калорийность доменного газа представляет собой случайный процесс, который будем характеризовать математическим ожиданием $Q_{н0}^{\delta z}$ и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{н}^{\delta z}$. В этих условиях текущий поток тепловой энергии (24) может быть представлен в виде случайного процесса:

$$(25) \quad Q_{ex}'(t) = B_{нз}(t) \cdot Q_{н}^{нз}(t) + B_{\delta z}(t) \cdot Q_{н0}^{\delta z}(t) + B_{\delta z}(t) \cdot z(t),$$

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

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

$$(26) \quad \eta_m(t) = \frac{Q_m'(t)}{Q_{ex}(t - \tau_z(t))},$$

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

$$(27) \quad \tau_z(t) = \arg \max_{\{\tau_z\}} \{M_t(\Delta Q_{ex}(t - \tau_z) \Delta Q_m'(t))\}.$$

Смысл экстремальной задачи состоит в том, что на ее основе по параметру τ_z в каждый момент времени t определяется максимум коэффициента корреляции между отклонениями $\Delta Q_{ex}(t - \tau_z)$, $\Delta Q_m'(t)$ 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 ($\Delta \eta_m$) от среднего значения. Для решения задач настройки системы регулирования при оценке текущего КПД используется линеаризация:

$$(28) \quad \eta_m(t) = \eta_{m,cp}(t) + \Delta \eta_m,$$

где среднее значение КПД определяется формулами:

$$(29) \quad \eta_{m,cp}(t) = \frac{Q_{m,cp}'(t)}{Q_{ex,cp}(t)},$$

$$(30) \quad Q_{m,cp}'(t) = M_t\{Q_m'(t)\},$$

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

Влияние режимных факторов оценивается на основе упреждающего соотношения

$$(32) \quad \Delta \eta_m = a_1(t) \cdot \Delta Q_{ex}(t - (\tau_z - \Delta \tau_y)) + a_2(t) \cdot \Delta P_e(t - (\tau_z - \Delta \tau_y)),$$

где

$$(33) \quad a_1(t) = \frac{\partial \eta_m}{\partial Q_{ex}(t - (\tau_z - \Delta \tau_y))};$$

$$(34) \quad a_2(t) = \frac{\partial \eta_m}{\partial P_e(t - (\tau_z - \Delta \tau_y))}.$$

Здесь $\Delta Q_{ex}(t)$, $\Delta P_e(t)$ – соответственно отклонение входного теплового потока и давления воздуха от среднего значения; $\Delta \tau_y$ – 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.

Автор выражает глубокую признательность д.т.н., проф. Казаринову Льву Сергеевичу за помощь и поддержку в проведении научных исследований по теме данной работы.

Литература

1. КАЗАКЕВИЧ В.В. Об экстремальном регулировании. Диссертация. МВТУ, 1944, – В кн. *Автоматическое управление и вычислительная техника*. М.: Машиностроение, 1964. Вып. 6 с. 7-53.
2. ФЕЛЬДБАУМ А.А. *Основы теории оптимальных автоматических систем*. – М.: Наука, 1966.
3. ЦЫПКИН Я.З. *Адапция и обучение в автоматических системах*. – М. Наука, 1968. – 400 с.
4. КРАСОВСКИЙ А.А. *Динамика непрерывных самонастраивающихся систем*. – М.: Физматгиз, 1963. – 313 с.
5. РАСТРИГИН Л.А. *Системы экстремального управления*. – М.: Наука, 1974. – 632 с.
6. Qin, S. Joe. *A survey of industrial model predictive control technology* / S. Joe Qin, Thomas A. Badgwell // *Control Engineering Practice*. –2003.–N 11. – P. 733–764;
7. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 27.07.2010) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (принят ГД ФС РФ 11.11.2009)

8. КРУТЬКО П.Д. *Обратные задачи динамики в теории автоматического управления*. Цикл лекций: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 С.
9. МАТВЕЙКИН В.Г., МУРОМЦЕВ Д.Ю. *Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения*: Монография. – М.: Издательство «Машиностроение», 2007.
10. СУЛТАНГУЗИН, И.А. *Научно-технические основы моделирования и оптимизации энерготехнологической системы металлургического комбината*: Дис. д-ра техн. наук. – М.: РГБ, 2005. – 414 С.
11. 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.
12. КАЗАРИНОВ Л.С., ГОРЕЛИК С.И. *Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №10. – С. 27-34.
13. 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.

ENERGY EFFICIENT PREDICTIVE CONTROL OF COMPLEX PROCESSES

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

Abstract: A method of energy efficient predictive control for complex processes is considered. An 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 offered.

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