

МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА

Л.С. Казаринов, А.В. Кинаш, А.И. Зозуля

A MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEM FOR OPTIMIZATION OF FUEL CONSUMPTION EFFICIENCY IN BOILERS

L.S. Kazarinov, A.V. Kinash, A.I. Zozulya

Рассматривается построение многосвязной системы оптимального регулирования экономичности потребления топлива для блока паровых котлов. Предлагается минимизировать потребление топлива за счет стабилизации режимных параметров и коррекция подачи воздуха по критерию максимума динамического КПД котла.

Ключевые слова: динамический КПД котла, адаптивное управление.

A multidimensional control system for optimization of fuel consumption efficiency in boilers is considered. Fuel consumption minimization due to regime parameters stabilization and air input correction is offered. Maximum of dynamic boiler efficiency was used as a real time criterion of air input correction.

Keywords: dynamic boiler efficiency, adaptive control.

Введение

Электрические станции металлургических предприятий потребляют значительные объемы топливных газов. Поэтому разработка и внедрение в эксплуатацию систем оптимального регулирования экономичности потребления топлива для них является актуальной проблемой.

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 (см. работы А.А. Красовского, А.П. Юркевича, Л.А. Растргина, А.А. Фельдбаума и др.). Непосредственно задача оптимизации режима работы энергетического котлоагрегата по критерию максимума КПД была рассмотрена В.В. Казакевичем [2].

В настоящее время задачи рассматриваемого класса, как правило, решаются с использованием методов прогнозирующего управления. Обзор современного состояния практических разработок систем оптимизации на основе прогнозирующего управления содержится в работе [3]. Критическим вопросом построения систем прогнозирующего управления является вычисление оценок критериев эффективности управляемого технологического

объекта в реальном времени. Для энергетических котлов подобным критерием является КПД брутто котла. Задача вычисления динамической оценки КПД брутто котла в реальном времени в настоящее время решена недостаточно, что и определяет актуальность данной работы.

Кроме того, для энергетических котлов, применяемых в металлургии, характерно использование вторичных энергетических ресурсов, таких как коксовый, доменный газы и др. Недостатком существующих работ в данной области является то, что задачи оптимизации, как правило, рассматриваются для однородного топлива. Однако за счет увеличения объема используемых вторичных энергетических ресурсов здесь можно минимизировать потребление природного газа. Данная задача эффективно решается в рамках многосвязного регулирования подачи топливных газов в котлоагрегат. С этой точки зрения подобная задача в литературе не рассматривалась.

1. Структура многосвязной системы оптимального регулирования (МСОР) экономичности потребления топлива

Рассмотрим задачу оптимизации режимов энергетических котельных установок, в которых

Казаринов Лев Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Кинаш Александр Викторович – аспирант ЮУрГУ; kinash@mmk.ru

Зозуля Анастасия Игоревна – аспирант ЮУрГУ; raed.gyfo@gmail.com

Kazarinov Lev Sergeyevich – PhD, professor, head of the Automation and control department of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Kinash Alexander Viktorovich – postgraduate student of SUSU; kinash@mmk.ru

Zozulya Anastasia Igorevna – postgraduate student of SUSU; raed.gyfo@gmail.com

утилизируются вторичные энергетические ресурсы металлургического производства.

Пусть теплоэнергетическая система состоит из блока параллельно работающих барабанных паровых котлов, вырабатывающих пар на общую паровую магистраль. За основной вид топлива в рассматриваемой системе примем природный газ, за вторичный энергетический ресурс – доменный газ.

Так как котлы работают на общую нагрузку, процессы потребления топлива котлами зависят друг от друга и необходимо проводить совместную оптимизацию их режимов. За счет этого можно достичь экономии потребления топлива для группы котлов. Вследствие взаимного влияния между котлами снижение потребления природного газа на одних котлах может обуславливать повышение потребления природного газа на других. По этой причине потребление топлива котлами осуществляется неравномерно. Все это приводит к снижению КПД котлов. Предлагаемая в работе многовязная система регулирования позволяет устранить указанные нежелательные эффекты и достичь экономии топлива для блока котлов в целом.

Основными регулируемыми величинами котла являются расход перегретого пара $D_{пп}$, его давление $p_{пп}$ и температура $t_{пп}$. Расход пара является переменной величиной, а его давление и температура поддерживаются в пределах допустимых отклонений, что обуславливается требованиями заданного режима работы турбины или иного потребителя тепловой энергии.

Кроме того, следует поддерживать в пределах допустимых отклонений значения следующих величин:

- уровня воды в барабане H_b – регулируется изменением подачи питательной воды $D_{пв}$;
- разрежения в верхней части топки S_T – регулируется изменением производительности дымоходов, отсасывающих дымовые газы из топки;
- оптимального избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha(O_2)$ – регулируется изменением производительности дутьевых вентиляторов, нагнетающих воздух в топку с помощью шиберов подачи воздуха;
- содержания котловой воды (в пересчете на NaCl) – регулируется изменением расхода воды $D_{гв}$, выпускаемой из барабана в расширитель продувки.

Перечисленные величины изменяются в результате регулирующих воздействий и под действием внешних и внутренних возмущений, носящих детерминированный или случайный характер. Котел в целом, например, по каналу топливо-расход или давление пара, является системой направленного действия. Однако выходные регулируемые величины некоторых участков являются одновременно входными по отношению к другим. Например, расход перегретого пара, являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива V_c (природного $V_{пг}$ и доменного $V_{дг}$ газов),

также служит входным воздействием по отношению к давлению и температуре перегретого пара; давление пара в барабане p_b , являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива, также одно из входных воздействий участка регулирования уровня воды в барабане H_b .

Таким образом, барабанный паровой котел как объект управления представляет собой сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами (рис. 1). Однако явно выраженная направленность отдельных участков по основным каналам регулирующих воздействий, таким как расход воды на впрыск $D_{впр}$ – перегрев $t_{пп}$, расход топлива V_c (природного $V_{пг}$ и доменного $V_{дг}$ газов) – давление $p_{пп}$ и др. позволяет осуществлять стабилизацию регулируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления. При этом регулирующее воздействие того или иного участка (сплошные линии на рис. 1) служит основным способом стабилизации его выходной величины, а другие воздействия (пунктирные линии) являются по отношению к этому участку внутренними или внешними возмущениями.

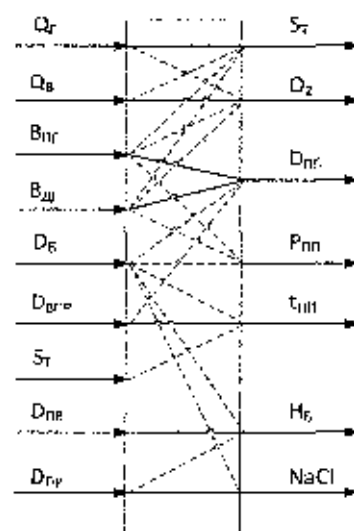


Рис. 1. Схема взаимосвязей между выходными и входными величинами в барабанном котле

Система управления барабанным котлом включает автономные САР процессов горения и парообразования, температур перегрева пара, питания и водного режима.

Ставится задача повысить экономичность использования топлива за счет оптимального управления режимами котла. Повышение экономичности использования топлива для индивидуального котла можно достичь за счет двух факторов:

- 1) повышения КПД процессов горения;
- 2) повышения объема потребления доменного газа.

Повышение КПД процессов горения достигается за счет оптимальной подачи воздуха в топку

по критерию максимума КПД. Соответствующая система оптимального регулирования приведена на рис. 2 (контур III).

Повышение объема потребления доменного газа достигается за счет увеличения производительности дымососа Q_T (вплоть до максимума), тем самым повышается разрежение в топке S_T . Открывая шибер доменного газа $\Pi_{ДГ}$, можно достичь увеличения объема потребления доменного газа (рис. 2, контур I). Однако повышение объема потребления доменного газа ограничивается требуемым разрежением в топке и требуемой температурой перегретого пара. Дело в том, что при повышении объема потребления доменного газа снижается разрежение в топке и растет температура перегретого пара. Положение усугубляется тем, что процесс потребления доменного газа является случайным с большими амплитудами колебаний. Вследствие этого разрежение в топке необходимо держать с большим запасом, чтобы при случайных колебаниях оно не снижалось до критического уровня. Это значительно ограничивает объем потребления доменного газа. Поэтому для стабилизации разрежения в топке необходимо использовать специальную систему автоматического регулирования, которая за счет перекрестных связей $B_{ДГ} \rightarrow S_T$ осуществляет стабилизацию разрежения в топке. Кроме того, необходимо предусматривать систему автоматической стабилизации температуры перегретого пара. В итоге, режим максимального потребления доменного газа будет характеризоваться следующими регулирующими действиями:

а) максимальной производительностью дымососа, устанавливаемой в ручном режиме машинистом;

б) максимальным допустимым открытием шибера доменного газа, которое осуществляется в автоматическом режиме на основе установки машинистом минимально допустимого задания по разрежению в топке S_{T0} для системы автоматической стабилизации разрежения;

в) автоматической стабилизацией температуры перегретого пара.

С учетом сказанного общая структурная схема МСОП котла приведена на рис. 2, где К – котел; S_{T0} – уставка разрежения в котле; S_T – разрежение в котле; $D_{ДГ0}$ – уставка расхода перегретого пара; $D_{ДГ}$ – расход перегретого пара; y_0^{opt} – уставка содержания кислорода в дымовых газах; y_0 – содержание кислорода в дымовых газах; $t_{ДГ0}$ – уставка температуры перегретого пара; $t_{ДГ}$ – температура перегретого пара; $R_{ДГ}$ – регулятор доменного газа; $R_{ПГ}$ – регулятор природного газа; R_P – адаптивный регулятор воздуха; $x_{ДГ}$, $x_{ПГ}$, x_A – регулирующее воздействия на устройства подачи доменного газа, природного газа и воздуха соответственно; $\Pi_{ДГ}$, Π_P – шибер доменного газа и шибер воздуха соответственно; $K_{ПГ}$ – клапан природного газа; $B_{ДГ}$, $B_{ПГ}$ – расход доменного и природного газа соответственно; Q_A – подача воздуха; $D_{ПГ}$ – вырыск воды для охлаждения перегретого пара; $t_{ПГ}$ – температура перегретого пара; Q_T – дымовые газы; $P_{ДГ}$ – давление доменного газа; I – контур регулирования по доменному газу; II – контур регулирования

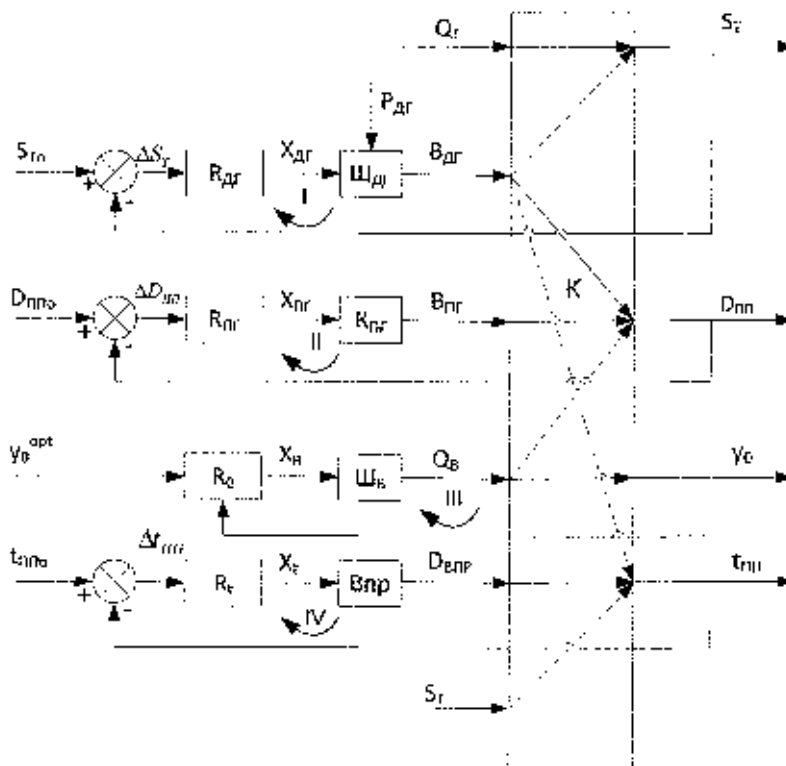


Рис. 2. Структура МСОП экономичности потребления топлива

по природному газу; III – контур регулирования по воздуху; IV – контур регулирования по впрыску.

Контур I: характеристики подаваемого в топку доменного газа (давление и калорийность) варьируются в зависимости от технологических процессов в домнах, что оказывает негативное влияние на уровень разрежения в топке. Поэтому управление подачей доменного газа осуществляется с учетом его влияния на разрежение в топке.

Контур II: осуществляется управление подачей природного газа в зависимости от установленной паровой нагрузки котла.

Контур III: осуществляется управление подачей воздуха. Критерием управления является максимум КПД котла.

Контур IV: осуществляется управление впрыском конденсата в зависимости от требуемой температуры перегретого пара.

2. МСОР блоком котлов

Рассмотрим далее структурную схему МСОР блоком котлов.

Схема многосвязной системы автоматического регулирования для блока параллельно работающих энергетических котлов представлена на рис. 3. Здесь $P_{\text{ма}}$ – давление пара в общей магистрали, к которой подключены потребители пара; $P_{\text{зад}}$ – уставка давления пара в магистрали; $\Delta P_{\text{за}}$ – сигнал рассогласования по давлению в магистрали; $Q_{\text{за}}'$ – задание нагрузки котла от главного регулятора; $Q_{\text{г}}'$ – тепловыделение в топке; $\Delta Q_{\text{г}}'$ – сигнал ошибки по нагрузке; $S_{\text{тр}}$ – задание разрежения в топке; $y_0^{\text{зад}}$ – задание содержания кислорода в

дымовых газах; $t_{\text{ДПР}}$ – задание температуры перегретого пара; S_{T} – разрежение в топке; y_0 – содержание кислорода в дымовых газах; $t_{\text{ДП}}$ – температура перегретого пара; ΔS_{T} – сигнал ошибки по разрежению в топке; Δy_0 – сигнал ошибки по содержанию кислорода в дымовых газах; $\Delta t_{\text{ДП}}$ – сигнал ошибки по температуре перегретого пара; $x_{\text{Д}}$, $x_{\text{В}}$, x_{T} – регулирующие воздействия на устройства подачи природного газа, доменного газа, воздуха и впрыска конденсата соответственно; $V_{\text{ДГ}}$ – расход природного газа; $V_{\text{ДГ}}$ – расход доменного газа; $Q_{\text{В}}$ – расход воздуха; $D_{\text{ВПР}}$ – впрыск конденсата; $R_{\text{ДГ}}$, $R_{\text{ДВ}}$, $R_{\text{В}}$, R_{T} – регулятор природного газа, доменного газа, воздуха и температуры перегретого пара соответственно; $K_{\text{ДГ}}$ – клапан природного газа; $\Pi_{\text{ДГ}}$, $\Pi_{\text{В}}$ – шиберы доменного газа и воздуха соответственно; Впр – устройство впрыска; x_{T} – управляющее воздействие от главного регулятора; d_i – доля нагрузки i -й котельной установки, задаваемая главным регулятором в общей нагрузке блока котлов; 0 – контур регулирования давления по магистрали; 1 – контур локального регулирования по тепловой нагрузке отдельного котла; II – контур локального регулирования по разрежению в топке; III – контур локального регулирования по кислороду; IV – контур локального регулирования по температуре перегретого пара; ЗРУ – задатчик ручного управления; $W_{\text{T}}(p)$ – передаточная функция главного регулятора; ВЧ – вычислитель сигнала $Q_{\text{г}}'$.

Для барабанных котлов вычисление сигнала $Q_{\text{г}}'$ осуществляется в соответствии с формулой, известной из теории систем автоматического регулирования рассматриваемого класса [4]:

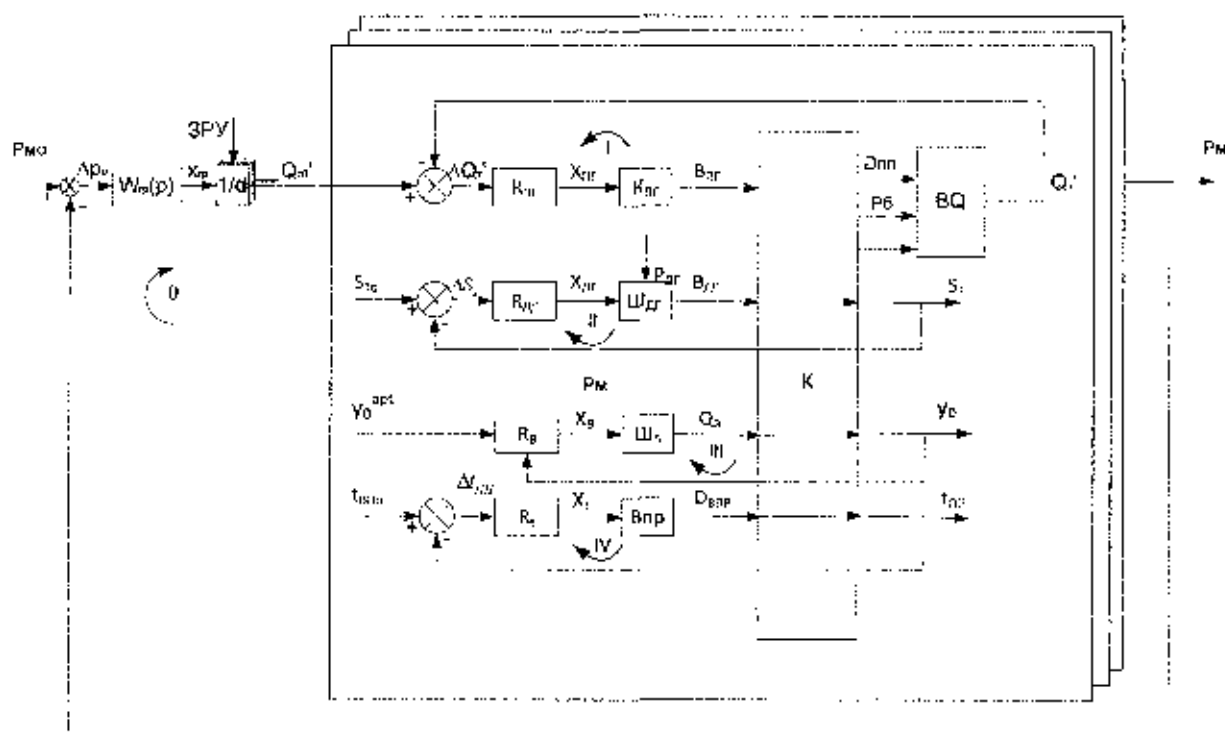


Рис. 3. Общая схема системы автоматического регулирования блоком котлов

$$Q_1' = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{dp_B}{dt} + (D_{1B} \cdot h'' - W_{11B} \cdot h_{B3}'' - A_2 \cdot (D_{1B} - W_{11B})), \quad (1)$$

где p_B , D_{1B} , h'' – давление, расход и энтальпия пара барабана котла; W_{11B} – расход питательной воды; h_{B3}'' – энтальпия воды экономайзера.

Непосредственно процессы регулирования осуществляют регуляторы подачи природного газа, доменного газа, воздуха и стабилизации температуры.

Указанные регуляторы реализуются на основе схемы пропорционально-дифференциального регулятора с вычислением сигналов с использованием цифрового экспоненциального фильтра. Применение экспоненциального фильтра обусловлено тем, что процессы в котле носят случайный характер и содержат высокий уровень шумов.

3. Адаптивная система коррекции подачи воздуха по критерию максимума КПД процессов горения

Составной частью рассматриваемой МСОР экономичностью потребления топлива является адаптивная система коррекции подачи воздуха по критерию максимума КПД процессов горения. Общая структура адаптивной системы приведена на рис. 4. Здесь Δy_0^{opt} – величина коррекции содержания кислорода по критерию максимума КПД котла; Δe_0 – ошибка коррекции по кислороду; x_0 – значение управляющей переменной подачи воздуха; x_0^{op} – значение управляющей переменной подачи воздуха, задаваемое машинистом-оператором; Δx_0 – величина коррекции по воздуху; y_0 – текущее процентное содержание кислорода в дымовых газах; y_0^{op} – номинальное процентное содержание кислорода в дымовых газах; Δy_0 – отклонение текущего содержания кислорода в дымовых газах от номинального; R_B – регулятор подачи воздуха; ИМ-К – исполнительный механизм котла.

Логика работы адаптивной системы состоит в следующем: задание по воздуху для котла должно исходить из максимального значения КПД процессов горения. Этому режиму соответствует определенный процент содержания кислорода в дымовых газах после пароперегревателя. Требуемое процентное содержание кислорода определяется картой рабочих режимов. Однако карта рабочих ре-

жимов определена для статических значений режимных параметров, в то время как для реального котла эти режимные параметры динамически изменяются в широких пределах. В частности, постоянно изменяются нагрузка котла, расход доменного газа и его калорийность. Поэтому номинальный уровень содержания кислорода в дымовых газах необходимо корректировать по текущему состоянию процессов горения в топке.

После того, как во внешнем контуре адаптации получен оптимальный коррекционный сигнал по кислороду, система автоматической коррекции по воздуху обрабатывает в следующем режиме оптимальное задание по воздуху.

Методика текущей оценки КПД топочных процессов приведена в литературе [5].

Аналитические соотношения для пропорционально-дифференциальных регуляторов подачи доменного газа, подачи воздуха и стабилизация температуры перегретого пара:

$$\mu_0 = A_{00}\mu_{10} + A_{01}e; \quad (2)$$

$$\mu_1 = A_{10}(\mu_{10} + \Delta t \mu_0); \quad (3)$$

$$\mu_{10} = \mu_0; \quad (4)$$

$$\mu_{0t} = \mu_1; \quad (5)$$

$$A0 = 2\mu_0 - C_\Phi \mu_1; \quad (6)$$

$$D1 = C_\Phi \mu_0 - C_\Phi^2 \mu_1; \quad (7)$$

$$x = K_R(A0 + T_R D1). \quad (8)$$

Здесь рекуррентные соотношения (2), (3) определяют экспоненциальный фильтр, который осуществляет сглаживание ошибки регулирования e на фоне помех. При этом вычисляются моменты μ_0 , μ_1 сигнала e . Величины μ_{00} , μ_{10} являются значениями моментов μ_n , μ_1 на предыдущем шаге итерации (4), (5). При запуске программы регулятора величины μ_{00} , μ_{10} устанавливаются нулевыми.

Основными параметрами экспоненциального фильтра являются величины: Δt – шаг дискретизации по времени; t_Φ – постоянная времени фильтра; $N_\Phi = t_\Phi / \Delta t$ – число точек измерения, используемых для текущего усреднения; $C_\Phi = 1/t_\Phi$ – декремент памяти фильтра; $A_{00} = N_\Phi / (N_\Phi + 1)$, $A_{01} = 1 / (N_\Phi + 1)$ – коэффициенты экспоненциального фильтра; $A0$ – текущее среднее значение входного сигнала; $D1$ – текущее среднее значение первой производной входного сигнала.

Собственно алгоритм регулятора определяется соотношением (8), где K_R – коэффициент усиле-

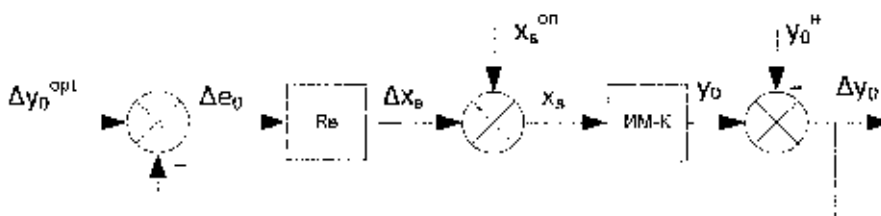


Рис. 4. Структура адаптивной системы коррекции подачи воздуха по критерию максимума

ция регулятора; T_k — коэффициент форсирования регулятора.

Постоянная времени фильтра подбирается экспериментально, исходя из условия фильтрации помех регулятором. Коэффициент усиления регулятора и коэффициент форсирования регулятора подбираются экспериментально, исходя из заданного качества процесса регулирования.

Заключение

Одним из существенных факторов, снижающих экономичность потребления природного газа на электрических станциях, является нестабильность режимных параметров, которые варьируются в широких пределах.

Так, основными источниками возмущений являются: резкие изменения нагрузки котлов, резкие изменения подачи доменного газа, изменения калорийности доменного газа. Указанные изменения носят случайный характер и происходят в достаточно быстром темпе, в котором машинист котла в рутном режиме физически не успевает реагировать. В результате, чтобы демпфировать резкие колебания режимных параметров и предотвратить возникновение аварийных ситуаций, машинист вынужден вести режимы с большими резервами. Применение соответствующей автоматики позво-

лит снизить указанные резервы и более экономично вести режимы по минимуму потребления природного газа при максимальном КПД. Кроме того, здесь необходимо принимать во внимание экологический фактор. Оптимальное ведение режимов позволит снизить уровень вредных выбросов электрическими станциями.

Литература

1. Казакевич, В.В. Автоматическое управление и вычислительная техника / В.В. Казакевич. — М.: Машиностроение, 1964. — Вып. 6. — С. 7–53.
2. Казакевич, В.В. Системы автоматической оптимизации / В.В. Казакевич, А.Б. Родок. — М.: Энергия, 1977. — С. 247–255.
3. 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.
4. Плетнев, Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнев. М.: Энергоиздат, 1981. — 368 с.
5. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): моногр. / под ред. Л.С. Казаринова. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. — 228 с.

Поступила в редакцию 21 декабря 2010 г.