

КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, А.В. Кинаш, О.В. Колесникова

CORRELATION-EXTREME CONTROL SYSTEM OF STEAM BOILER ENERGY EFFICIENCY

L.S. Kazarinov, D.A. Shnaider, A.V. Kinash, O.V. Kolesnikova

В статье рассматривается корреляционно-экстремальная система управления энергетической эффективностью паровых котлов, позволяющая обеспечивать максимальный КПД сгорания топлива в топке котла.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система, управление энергетической эффективностью, паровой котел.

The paper considers the correlation-extreme control system of steam boilers energy efficiency, which allows to ensure maximum efficiency of fuel combustion in the boiler furnace.

Keywords: correlation-extreme system, energy efficiency management, steam boiler

Введение

Рассмотрим задачу оптимизации режимов энергетических котельных установок, в которых утилизируются вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) металлургического производства. В качестве ВЭР могут выступать доменный газ, коксовый газ и другие виды ресурсов.

1. Общая схема системы автоматического регулирования для блока энергетических котлов

Типовая схема системы автоматического регулирования для блока энергетических котлов представлена на рис. 1. Здесь p_m - давление пара в магистрали, к которой подключены потребители пара; p_{mo} - уставка давления пара в магистрали; Δp_m - сигнал рассогласования по давлению в магистрали; $Q_{тo}$ - задание нагрузки котла от главного регулятора; $Q_{т'}$ - тепловыделение в топке; $\Delta Q_{т'}$ - сигнал ошибки по нагрузке; B_{nc} - расход природного газа; B_{ac} - расход доменного газа (ВЭР); Q_b -

расход воздуха; x_{nr} - управляющее воздействие по природному газу от регулятора природного газа; x_b - управляющее воздействие по воздуху; x_{rp} - управляющее воздействие от главного регулятора; d_i - доля нагрузки i -й котельной установки, задаваемая главным регулятором; I - контур регулирования давления по магистрали; II - контур регулирования по тепловой нагрузке отдельного котла; III - контур регулирования по воздуху; ЗРУ - датчик ручного управления; $W_{pc}(p)$ - передаточная функция регулирования подачи природного газа; f_b - функция задания воздуха; f_k - функция коррекции по содержанию кислорода; $W_{pc}(p)$ - передаточная функция регулирования воздуха; $W_{sp}(p)$ - передаточная функция главного регулятора; BQ - вычислитель сигнала $Q_{т'}$.

Для барабанных котлов вычисление сигнала $Q_{т'}$ осуществляется в соответствие с формулой, известной из теории систем автоматического регулирования рассматриваемого класса [1]:

Казаринов Лев Сергеевич - д-р техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, kazarinov@ait.susu.ac.ru

Шнайдер Дмитрий Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ, shnayder@ait.susu.ac.ru

Кинаш Александр Викторович - аспирант кафедры автоматики и управления ЮУрГУ, ведущий специалист ЦЭС ОАО «ММК»; kinash@mmk.ru

Колесникова Ольга Валерьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ, porova_ov@ait.susu.ac.ru

Kazarinov Lev Sergeevich - PhD, professor, dean of Electronics faculty of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Shnaider Dmitry Aleksandrovich - PhD, associate professor of Automation and control department of SUSU; shnayder@ait.susu.ac.ru

Kinash Alexander Viktorovich - postgraduate student of Automation and control department of SUSU, leading expert on automation of Central power station of «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» (open joint stock company); kinash@mmk.ru

Kolesnikova Olga Valerievna - PhD, associate professor of Automation and control department of SUSU; porova_ov@ait.susu.ac.ru

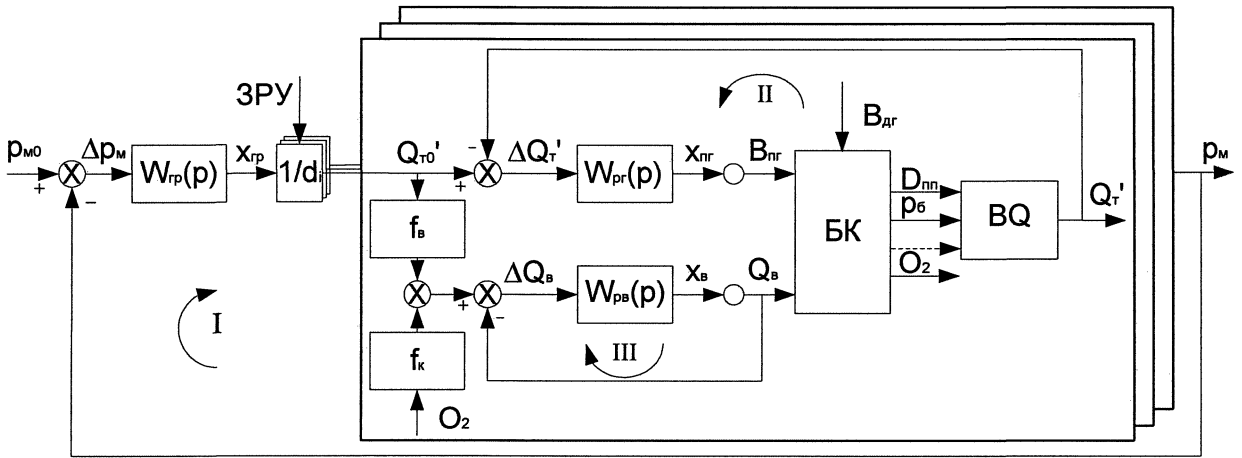


Рис. 1. Общая схема системы автоматического регулирования блоком котлов

$$Q'_T = \frac{1}{A_1} \frac{dp_б}{dt} + (D_б h'' - W_{п.в} h''_{в.э}) - A_2 (D_б - W_{п.в}). \quad (1)$$

Здесь $p_б$, $D_б$, h'' - давление, расход и энтальпия пара барабана котла, $W_{п.в}$ - расход питательной воды, $h''_{в.э}$ - энтальпия воды экономайзера.

Непосредственно процессы регулирования осуществляет регулятор подачи природного газа с передаточной функцией $W_{пр}$ и регулятор подачи воздуха $W_{рв}$, $Q'_{т0}$ - задание по теплоте. Задание по воздуху $Q'_{в0}$ определяется на основе задания по теплоте

$$Q'_{в0} = f_в(Q'_{т0}), \quad (2)$$

где $x_{пр}$, $x_в$ - регулирующие воздействия на устройства подачи природного газа и воздуха соответственно (см. рис. 1).

Использование ВЭР в котельных установках позволяет значительно экономить расход природного газа, тем самым, обеспечивая высокую степень эффективности использования топлива. При этом желательно обеспечить минимум потребления природного газа. Это достигается путем построения оптимальной зависимости расхода воздуха от тепловыделения в топке котла (2).

На рис. 2а изображено семейство кривых $\frac{\partial B_{пр}}{\partial Q'_{т0}}(Q'_T)$ при различных значениях давления воз-

духа $Q'_{в}$, где $\frac{\partial B_{пр}}{\partial Q'_T}$ - прирост природного газа. Если

ли к этому семейству кривых провести нижнюю касательную, то можно получить точки оптимального потребления природного газа для данного значения задания $Q'_{в}$. По этим точкам строится функция задания воздуха $f_в$ (рис. 2б). Таким образом, функция задания воздуха $f_в$ определяется исходя из критерия минимума потребления природного газа.

Графики на рис. 2 получаются на основе теплотехнических испытаний котельной установки. Нижняя асимптота экспериментальных графиков определяет минимальную границу относительного прироста топлива. Режимы работы котельной установки, соответствующие минимальной границе относительного прироста топлива, характеризуются максимальным КПД процесса горения топлива.

В процессе работы котла характеристики ВЭР (расход, калорийность) могут изменяться в широких пределах, что вызывает нарушения условий оптимальности режимов. В этом случае целесообразно использовать адаптивную коррекцию параметров режимов котла.

Режимы горения в топках котлов характеризуются ярко выраженной экстремальной характеристикой как по подаче воздуха, так и по его на-

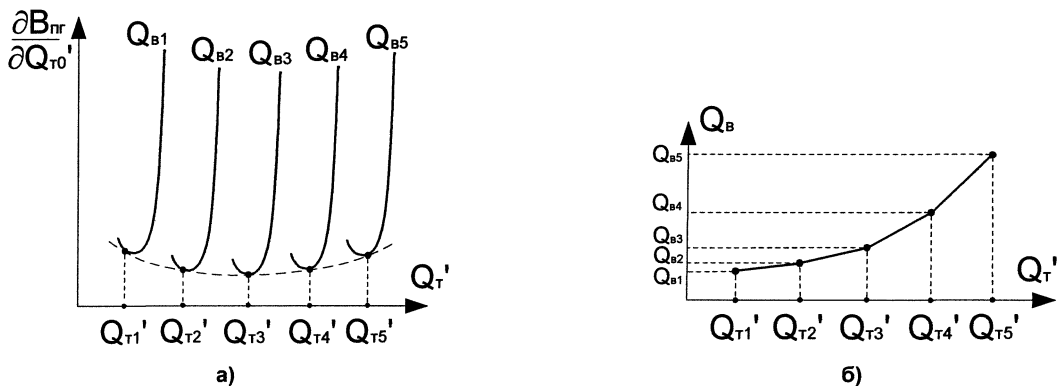


Рис. 2. Определение задания по воздуху

грузке. Примерный вид экстремальной характеристики по подаче воздуха приведен на рис. 3.

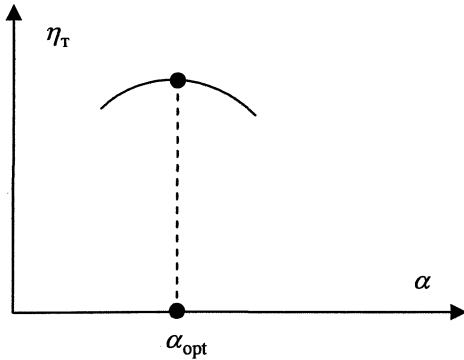


Рис. 3. Зависимость КПД котла от коэффициента избытка

Здесь КПД котла оценивается величиной

$$\eta_{\tau} = \frac{Q'_{\tau}}{Q_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где Q'_{τ} - тепловыделение в топке, $Q_{\text{вх}}$ - тепло, вносимое в топку с топливом.

Коэффициент избытка воздуха определяется соотношением

$$\alpha = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{вн}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{в}}$ - подача воздуха в топку, $Q_{\text{вн}}$ - минимальный расход воздуха, необходимый для полного сгорания топлива. Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха α обычно лежит в диапазоне 1,05-1,2.

2. Алгоритм адаптивного управления

Для адаптивного управления котлом необходимо производить оперативную оценку текущего значения КПД. В данном случае выражение (3) не является корректным, так как оно определено для средних величин. С этой целью рассмотрим текущие значения величин Q'_{τ} , $Q_{\text{вх}}(t)$:

$$Q_{\text{вх}}(t) = B_{\text{пр}}(t)Q_{\text{н}}^{\text{пр}}(t) + \sum_i B_i(t)Q'_i(t), \quad (5)$$

где $B_{\text{пр}}(t)$, $B_i(t)$ - текущие объемы расхода природного газа и вторичных энергетических ресурсов соответственно, $Q_{\text{н}}^{\text{пр}}(t)$, $Q'_i(t)$ - величины нижней удельной теплоты сгорания (калорийности) соответствующих видов топлива. При неизвестной текущей калорийности топлива в выражении (5) могут быть использованы средние величины.

Текущее значение КПД можно оценить на основе соотношения

$$\eta_{\tau}(t) = \frac{Q'_{\tau}(t)}{Q_{\text{вх}}(t-\tau(t))}, \quad (6)$$

где $\tau(t)$ - запаздывание, определяемое на основе решения экстремальной задачи

$$\tau(t) = \arg \max_{\{\tau\}} \{M_t(\Delta Q_{\text{вх}}(t-\tau)\Delta Q'_{\tau}(t))\}. \quad (7)$$

Смысл экстремальной задачи (7) состоит в том, что на ее основе по параметру τ в каждый момент времени t определяется максимум коэффициента корреляции $K_{\tau}(t, \tau)$ между отклонениями $\Delta Q_{\text{вх}}(t-\tau)$, $\Delta Q'_{\tau}(t)$ от средних значений. Оператор $M_t(\cdot)$ - оператор текущего усреднения, который в дискретном варианте имеет вид

$$x_{\text{cp}}(t_k) = M_t(x(t_k)) = \frac{N-1}{N}x_{\text{cp}}(t_{k-1}) + \frac{1}{N}x(t_k), \quad (8)$$

где N - число дискретных шагов усреднения.

$$K_{\tau}(t, \tau) = M_t(\Delta Q_{\text{вх}}(t-\tau)\Delta Q'_{\tau}(t)). \quad (9)$$

Зная текущее значение КПД (6), можно оценить степени влияния действующих режимных факторов (в данном случае нагрузки котла Q'_{τ} и подачи воздуха $\Delta Q_{\text{в}}$) на отклонения КПД ($\Delta \eta_{\tau}$) от среднего значения. Для решения задач настройки системы регулирования при оценке текущего КПД будем использовать линеаризацию:

$$\eta_{\tau}(t) = \eta_{\tau, \text{cp}}(t) + \Delta \eta_{\tau}, \quad (10)$$

где среднее значение КПД определяется формулами:

$$\eta_{\tau, \text{cp}}(t) = \frac{Q'_{\tau, \text{cp}}(t)}{Q_{\text{вх}, \text{cp}}(t)}, \quad (11)$$

$$Q'_{\tau, \text{cp}}(t) = M_t\{Q'_{\tau}(t)\}, \quad (12)$$

$$Q_{\text{вх}, \text{cp}}(t) = M_t\{Q_{\text{вх}}(t)\}. \quad (13)$$

Влияние режимных факторов будем оценивать на основе соотношения

$$\Delta \eta_{\tau} = \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial Q_{\text{вх}}(t-\tau)} \Delta Q_{\text{вх}}(t-\tau) + \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial P_{\text{в}}(t-\tau)} \Delta P_{\text{в}}(t-\tau), \quad (14)$$

где $\Delta Q_{\text{вх}}(t)$ - отклонение входного теплового потока от среднего значения; $\Delta P_{\text{в}}(t)$ - отклонение давления воздуха от среднего значения.

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2, \quad (15)$$

где a_i - относительный коэффициент влияния отклонений подачи топлива на КПД

$$a_1 = \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial Q_{\text{вх}}(t-\tau)},$$

a_2 - относительный коэффициент влияния отклонений подачи воздуха на КПД

$$a_2 = \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial P_{\text{в}}(t-\tau)},$$

x_1 , x_2 - отклонения входных сигналов по теплу и давлению воздуха от средних значений

$$x_1 = \Delta Q_{\text{вх}}(t),$$

$$x_2 = \Delta P_{\text{в}}(t).$$

Определение коэффициентов влияния в соответствии с соотношением (15) находится методом наименьших квадратов на основе решения системы линейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} c_{11}a_1 + c_{12}a_2 &= d_1 \\ c_{21}a_1 + c_{22}a_2 &= d_2 \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где $c_{11} = M\{x_1^2\}$; $c_{12} = c_{21} = M\{x_1x_2\}$; $c_{22} = M\{x_2^2\} + \lambda$; $d_1 = M\{yx_1\}$; $d_2 = M\{yx_2\}$, λ – параметр регуляризации.

На основе полученного решения определяют нормированные коэффициенты влияния, которые служат индикаторами оптимальности процесса горения в топке котла:

– нормированный коэффициент влияния отклонения подачи топлива на КПД котла

$$R_T = a_1 \frac{\sigma_{\Delta Q_{вх}}}{\sigma_{\Delta \eta_T}}, \quad (17)$$

– нормированный коэффициент влияния отклонения подачи воздуха на КПД котла

$$R_B = a_2 \frac{\sigma_{\Delta P_B}}{\sigma_{\Delta \eta_T}}, \quad (18)$$

где $\sigma_{\Delta Q_{вх}}$, $\sigma_{\Delta P_B}$, $\sigma_{\Delta \eta_T}$ – средние квадратические отклонения, определяемые по соотношениям

$$\sigma_{\Delta Q_{вх}} = \sqrt{M_t\{\Delta^2 Q_{вх}\}}, \quad \sigma_{\Delta P_B} = \sqrt{M_t\{\Delta^2 P_B\}},$$

$$\sigma_{\Delta \eta_T} = \sqrt{M_t\{\Delta^2 \eta_T\}}.$$

Коэффициенты, рассчитанные по формулам (17), (18), определяют наличие связи между изменением входного параметра (отклонения от среднего значения входного теплового потока котла, вносимого топливными газами, или давления воздуха) и изменением выходного параметра (отклонения КПД от среднего значения). Нормированные коэффициенты влияния могут принимать значения:

- положительные – что свидетельствует о наличии прямой связи между изменением входного параметра и изменением выходного параметра, т.е. изменение входного параметра (например, входного теплового потока) в сторону увеличения приводит к увеличению выходного параметра (КПД котла);
- отрицательные – в наличии обратная связь

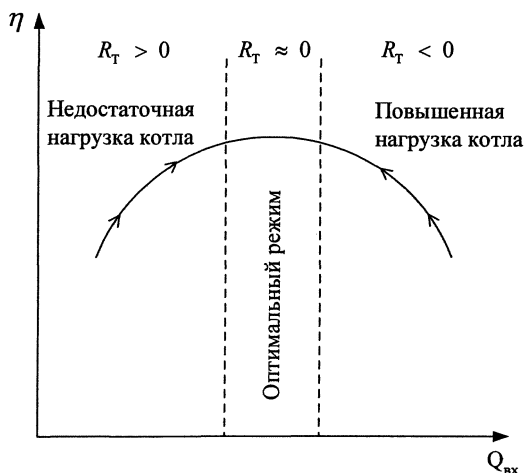


Рис.4

между изменением входного параметра и изменением выходного параметра, т.е. изменение входного параметра (например, входного теплового потока) в сторону увеличения приводит к уменьшению выходного параметра (КПД котла).

Градации по величине от «-1» до «1» показывают, насколько сильной является связь между изменением входного параметра и изменением выходного параметра. Так, если коэффициент равен «0», то связь отсутствует, если равен «1» – полная прямая связь, «-1» – полная обратная связь.

Так как процессы являются случайными, то связь может принимать дробные значения. Например, связь 0,3 означает, что в 30 % случаев наблюдалась положительная связь, в остальных случаях связи не наблюдалось.

Сказанное выше иллюстрируется следующими графиками, приведенными на рис. 4, 5. Здесь η – КПД котла; $Q_{вх}$ – тепло, вносимое в топку котла с топливными газами; R_T – коэффициент влияния отклонения подачи топлива на КПД брутто котла; P_B – давление воздуха; R_B – коэффициент влияния отклонения подачи воздуха на КПД котла; --->--- направление движения к оптимальному режиму.

Величины коэффициентов влияния отклонений подачи топлива и воздуха на КПД котла служат критерием оптимальности процессов горения котла.

Например, если $R_T > 0,1$, то нагрузка котла является недостаточной. В этом случае оператор котла должен добавить расход топливных газов на котел. Если $R_T < -0,1$, то нагрузка котла является повышенной. В этом случае оператор котла должен убавить расход топливных газов на котел. Если $-0,1 < R_T < 0,1$, то нагрузка котла является близкой к оптимальной. В этом случае оператор не должен изменять расход топливных газов.

Если $R_B > 0,075$, то в топке наблюдается недостаток подачи воздуха для данной нагрузки. В этом случае оператор котла должен добавить расход воздуха на котел. Если $R_B < -0,075$, то в топке наблюдается избыток подачи воздуха для данной нагрузки. В этом случае оператор котла должен убавить расход

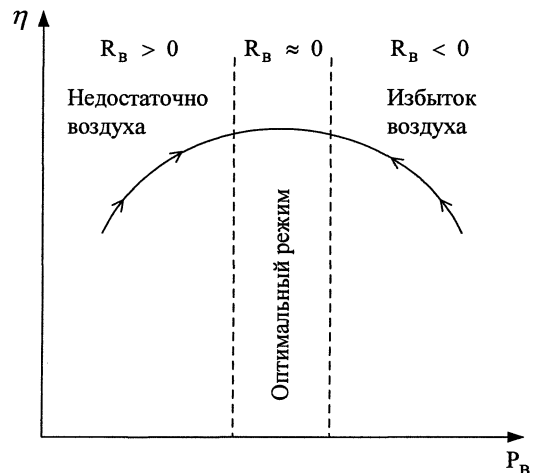


Рис.5

воздуха на котел. Если $-0,075 < R_b < 0,075$, то уровень подачи воздуха для данной нагрузки близок к оптимальному. В этом случае оператор не должен изменять расход воздуха.

В целом, на основе оперативного управления режимными параметрами с использованием описанного выше подхода, реализуется корреляционно-экстремальное управление энергетической эффективностью котельной установки.

3. Обобщение на технологические процессы широкого класса

Изложенный выше подход к адаптивному управлению котельными установками на основе оперативной оценки текущего КПД допускает обобщение на технологические процессы общего вида.

Предположим, что энергоемкость некоторого технологического процесса оценивается на основе показателя

$$a_{cp} = \frac{V_{cp}}{P_{cp}},$$

где V_{cp} , P_{cp} - средние объемы потребления ресурса и производства продукции соответственно, полученные на основе операции усреднения во времени:

$$V_{cp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt, \quad P_{cp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt.$$

Ставится задача: построить оперативную оценку энергоемкости технологического процесса, минимизация которой в текущем времени привела бы к минимизации средней оценки энергоемкости процесса.

Оперативную оценку энергоемкости будем искать в виде

$$a^*(t) = \frac{V^*(t)}{P^*(t)},$$

где $V^*(t)$, $P^*(t)$ - текущие оценки объемов потребления ресурса и производства продукции.

Для корректного определения оперативных оценок текущих объемов потребления ресурса и производства продукции будем предъявлять к ним следующие требования.

1. Условие несмещенности. Оценки $V^*(t)$, $P^*(t)$ должны быть несмещенными в том смысле, что для них выполняются равенства

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V^*(t) dt = V_{cp}^* = V_{cp},$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P^*(t) dt = P_{cp}^* = P_{cp}$$

2. Условие упреждаемости. Решение об эффективности использования импульса энергии V на входе технологического процесса должно быть принято прежде, чем импульс энергии будет полностью использован в данном процессе на производство продукции P

3. Условие синхронности. Данное условие основывается на понятии группового запаздывания

импульса потребленной энергии на выходе технологического процесса относительно импульса энергии на входе указанного процесса. С этой точки зрения при определении оценки $a^*(t) = V^*(t)/P^*(t)$ импульсы энергии, соответствующие оценкам $V^*(t)$, $P^*(t)$, должны быть синхронными. Другими словами, оценка импульса энергии $V^*(t)$ на момент времени t должна быть выполнена таким образом, чтобы она отражала именно тот импульс энергии, который был использован на производство продукции $P^*(t)$.

4. Условие независимости измерений. Оценки $V^*(t)$, $P^*(t)$ должны быть получены на основе независимых измерений.

5. Условие помехоустойчивости. Влияние помех при измерении величин $V(t)$, $P(t)$ не должно приводить к неустойчивости вычисляемых оценок $V^*(t)$, $P^*(t)$.

В приведенном выше примере оперативной оптимизации КПД котельной установки все указанные выше условия выполняются. Действительно, несмещенность оценки непосредственно следует из определения среднего КПД (3) и текущего КПД (6). Условие упреждаемости обеспечивается тем, что при определении КПД используется не выходной тепловой поток $Q_{вых}$, а тепловыделение в топке Q_T , оцениваемое на основе обратного динамического оператора (1). Хотя упреждаемость в полном смысле слова здесь не достигается, однако оценка Q_T обладает значительно большим быстродействием по сравнению с оценкой $Q_{вых}$. Синхронизация обеспечивается условиями (6), (7). Независимость измерений следует из определения текущего КПД, где величины Q_T и $Q_{вых}(t-\tau(t))$. Помехоустойчивость оценки может быть обеспечена, если, например, все вычисления на фоне помех производятся с использованием экспоненциальных цифровых фильтров.

В общем случае построение оперативной оценки текущей энергетической эффективности технологического процесса, удовлетворяющей приведенным выше условиям, является достаточно сложной нетривиальной задачей. Решение данной задачи необходимо производить на основе знания динамики конкретного технологического процесса.

Заключение

Приведенный в статье алгоритм позволяет в следящем режиме обеспечивать максимальный КПД сгорания топлива в топке энергетического котла. Тем самым обеспечивается высокая эффективность использования ВЭР в котельных установках при переменных характеристиках ВЭР.

Литература

1 Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнев. - М.: Энергоиздат, 1981

Поступила в редакцию 23 декабря 2009 г.