

М.А. ДУЭЛЬ, д-р техн. наук, профессор; проф. УИПА, Харьков;
Г.И. КАНЮК, д-р техн. наук, профессор; проф. УИПА, Харьков;
Т.Н. ФУРЦОВА, канд. техн. наук; доц. УИПА, Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ ВНУТРИБЛОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Рассмотрены вопросы оптимизации внутриблочных технологических процессов ТЭС для повышения качества и эффективности работы системы автоматического регулирования в реальных условиях эксплуатации энергоблока. Для решения оптимизационных задач проводится декомпозиция энергоблока как объекта управления. В качестве примера оптимизации подсистем автоматического управления энергоблока рассмотрена система оптимизации процесса горения в топке парогенератора ТЭС.

Ключевые слова: системы автоматического регулирования и управления, технологические процессы, оптимизация, энергоблок.

Актуальность работы

Управление любым объектом по существу состоит из выбора цели (критерия) управления и подачи управляющих воздействий на объект, необходимых для достижения этой цели. Способ формирования управляющих воздействий может существенно меняться в зависимости от условий, в которых в данный момент времени находится объект управления.

В настоящее время, при практической реализации систем управления недетерминированными объектами, функции устранения влияния недетерминизма выполняют автоматические регуляторы, которые совместно с объектом, режим которого они регулируют, образуют систему автоматического управления (САУ).

Наиболее широко САУ сейчас используют в стационарных эксплуатационных режимах энергооборудования для стабилизации регулируемых параметров (САР).

Анализ исходных предпосылок синтеза САУ и САР, установившихся к настоящему времени, показывает, что эти предпосылки часто не соответствуют реально возникающим ситуациям, учет которых может значительно повысить эффективность функционирования этих систем.

Анализ состояния вопроса и цель исследования

Наиболее существенные недостатки применяемых методов синтеза САУ и САР заключаются в следующем:

1) Обычно предполагается, что входные воздействия на регулируемый объект являются доступными для контроля и имеется возможность получить математическое описание объекта относительно всех этих воздействий, например, в виде системы дифференциальных уравнений. Учет случайного характера функционирования объекта ограничивается при этом, как правило, лишь учетом случайного характера изменения внешних возмущающих воздействий на объект, вероятностные характеристики которых также предполагаются известными. В действительности же реальные энергообъекты в условиях эксплуатации находятся под воздействием весьма большого числа случайных возмущений, действующих по различным каналам. Причем среди них могут быть вообще недоступные для контроля.

2) Задача синтеза САУ и САР обычно рассматривается как задача определения наилучшего закона (алгоритма) формирования управляющих действий. При этом

выбор их схем производится на основании чисто структурных соображений, т.е. исходя из характера взаимодействия отдельных элементов системы, определяемых лишь видом математического описания этих элементов, вне связи с физическими особенностями и выполняемыми ими функциями.

Между тем, имеющийся опыт построения подобных систем показывает, что определяющее значение здесь приобретает не задача выбора алгоритмов функционирования соответствующих регуляторов, а задача получения оптимальной схемы получения текущей информации о состоянии объекта регулирования, которая объективно отражает характер взаимодействий между двумя основными функциональными элементами автоматических систем – объектом и регулятором.

Регулирование по конечному эффекту, т.е. путем оценки текущего значения показателя цели регулирования, как правило, не позволяет осуществить его поддержание на требуемом уровне с требуемой точностью даже при использовании самого совершенного закона управления, так как показатель цели управления обычно реагирует на изменение управляющих воздействий с запаздыванием во времени. В результате информация, заключенная в текущем значении этого показателя, оказывается обесцененной.

3) Практически почти каждая действующая САР производственных процессов является системой косвенного регулирования, в которой на вход регулятора подается не сам показатель цели регулирования, а соответствующим образом подобранные косвенные величины, связанные с показателем цели регулирования достаточно тесной зависимостью. По-видимому, по той же причине не нашли сколько-нибудь широкого распространения автоматические поисковые оптимизаторы технико-экономических показателей промышленных объектов; их функции как правило, значительно более успешно выполняют обычные системы регулирования косвенных величин, т.е. объективно такие системы следует рассматривать не только как системы стабилизации, но и как системы автоматической оптимизации режимов работы объектов.

4) Обычно применяемая процедура синтеза САУ и САР исходит из того, что должна быть известна математическая модель регулируемого объекта, основываясь на которой и осуществляют все расчеты по динамике этих систем. Однако синтез этих систем по заранее заданной модели может быть выполнен только с определенной погрешностью, обусловленной различием реального объекта и аппроксимирующей его моделью. Благоприятные возможности для компенсации этой погрешности обусловлены широким использованием средств вычислительной техники при построении АСУ ТП энергоблоками электростанций [1–5].

Таким образом, опыт создания и эксплуатации САУ и САР позволяет сделать вывод о необходимости использования при их синтезе современных информационных методов получения объективной информации. Целью работы является анализ перспектив совершенствования и развития применяемых методов синтеза систем автоматического регулирования (САР) и систем автоматического управления (САУ).

Оптимизация внутриблочных технологических процессов

Экономически наиболее выгодным режимом работы энергосистемы называется такой режим, при котором потребители получают электрическую и тепловую энергию допустимого качества, при наименьших затратах на её производство, передачу и распределение. По аналогам назовем экономически наиболее выгодным режим работы энергоблока на электростанции такой режим, который удовлетворяет наиболее выгодному режиму работы энергосистемы в целом.

Из общего определения критерия $W(T)$ можно выделить две составляющие: *внешнюю* (с точки зрения потребителя) выдавать необходимую энергию допустимого качества и *внутреннюю* (с точки зрения производителя) – требование наименьших затрат на её производство. Эти составляющие можно рассматривать отдельно, так как они, как правило, входят в критерий аддитивно.

Переходя к анализу внешней составляющей общего критерия, необходимо, прежде всего, выделить группу управляющих воздействий, которые по технологическому процессу относятся ко всей станции в целом (например, распределение электрической нагрузки между энергоблоками). Оптимизация этих управлений должна решаться по общестанционному критерию, но их следует учитывать при решении задач оптимизации управления отдельными блоками.

Показатели качества электроэнергии, на которые воздействует оперативное управление – частота и мощность. При работе энергоблока в режиме регулирования частоты системы величина внешней составляющей пропорциональна модулю разности действительной и заданной частот. При работе в базовом режиме наиболее существенным во внешней составляющей является требование поддержания заданной диспетчерской нагрузки энергоблока.

Оптимальное распределение электрической нагрузки в крупных энергосистемах не гарантирует совпадения диспетчерской нагрузки энергоблока с нагрузкой, обеспечивающей минимальную себестоимость электроэнергии, вырабатываемой этим блоком. Поэтому при его эксплуатации требуется обеспечение длительной аварийной работы с максимальной экономичностью при соблюдении диспетчерского графика нагрузки.

Специфика производства электроэнергии на современных энергоустановках исключает возможность её запаса. Поэтому невыполнение диспетчерского графика данным энергоблоком влечет за собой замещение его другими энергоблоками данной ТЭС или энергосистемами. Естественно, что если распределение нагрузки было оптимальным с точки зрения критерия энергосистемы, то нарушение графика ведет к потере экстремума, хотя по внутренней составляющей для критерия энергоблока оно может привести к выигрышу. Целесообразно было бы отнести эти потери к внешней составляющей критерия энергоблока $W(T)$. Так, если изменение внутренней составляющей в результате нарушения равно ΔW_1 , а внешней ΔW_2 , то изменение критерия $\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2$. Очевидно, что при оптимальном распределении нагрузки $\Delta W_2 < 0$ и $\Delta W < 0$, т.е. нарушение диспетчерского графика не должно привести к выигрышу для энергоблока.

Оценку величины ΔW_2 можно произвести, например, в виде штрафа за нарушение графика [1]

$$\Delta W_2 = \Delta W_2 \left(|\Delta N|, \text{Sign} \Delta N, N^*, \varepsilon, \lambda \left(\Delta N \right) \right)$$

где $\Delta N = \Delta N - N^*$ – величина нарушения графика; N^* – заданная по диспетчерскому графику нагрузка для энергоблока; N – текущая нагрузка; ε – коэффициент использования для ТЭС; $\lambda(\Delta N)$ – величина штрафа.

Для определения внешней составляющей критерия оптимального управления энергоблоком необходимо прогнозировать диспетчерский график нагрузки блока и величину штрафа за его нарушение.

Внутренняя составляющая общего критерия оптимального управления $W(T)$ энергоблоком и станцией в целом – это себестоимость отпускаемой электроэнергии. Составляющие себестоимости (прежде всего расходы на топливо, амортизацию оборудования, текущий ремонт и заработную плату персоналу электростанции) являются функционалами от управления. На рис. 1 приведена схема связи себестоимости вырабатываемой электроэнергии с основными функциями системы управления энергоблоком. На ней показаны основные каналы воздействия каждого вида управления на составляющие себестоимости.

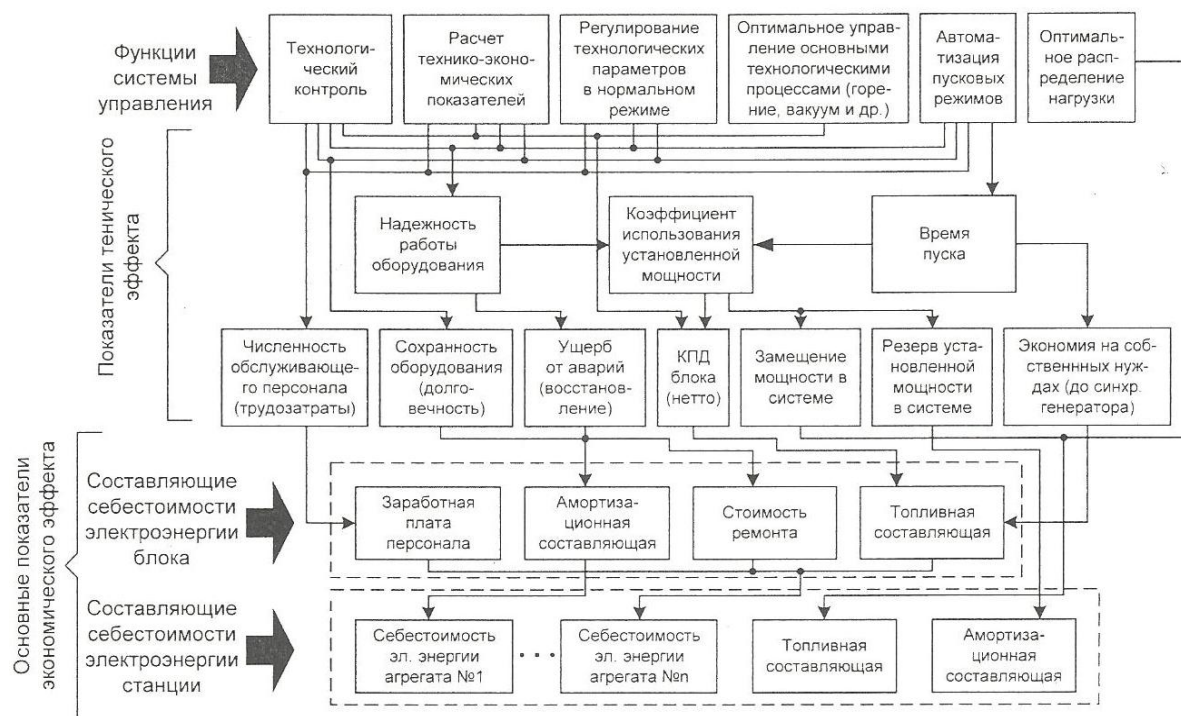


Рис. 1 – Схема связи себестоимости электроэнергии с управлением энергоблоком

Таким образом, для реализации общего критерия $W(T)$ оптимального управления энергоблоком необходимо знание моделей технологического процесса, прогнозирование и диспетчерского графика, а также измерение текущих значений параметров и сводных технико-экономических показателей (ТЭП) [2, 4].

Построение оптимизационных внутриблочных подсистем управления

Укрупненная структурная схема системы управления, минимизирующая сформулированный выше общий критерий оптимального управления энергоблоком $W(T)$, может быть представлена в виде трех иерархических уровней (рис. 2): системы автоматического регулирования и управления режимом энергоблока, системы оптимизации внутриблочных технологических процессов и системы оптимального решения общестанционных задач.

Основной задачей системы оптимизации внутриблочных технологических процессов является повышение качества и эффективности работы системы автоматического регулирования в реальных условиях эксплуатации энергоблока.



Рис. 2 – Структурная схема системы управления энергоблоком

Необходимость этого обусловлена, во-первых, наличием различных неконтролируемых возмущений, существенно влияющих на оптимальный режим и, во-вторых, сложной структурой энергоблока как объекта управления с множеством изменяющихся во времени взаимосвязей между технологическими параметрами, учет которых очень усложнил бы систему регулирования.

Решение оптимизационных задач в общей постановке минимизации критерия очень сложно. В связи с этим обычно проводится декомпозиция, которая позволяет упростить решение путем расчленения всей системы на отдельные подсистемы с частными критериями, обеспечивающими её функционирование в целом в соответствии с общим критерием оптимального управления. При этом используется метод наименьших взаимосвязей между выделенными подсистемами.

В базовых режимах, составляющих большую часть времени работы энергоблока, основную роль в общем критерии оптимального управления играет его внутренняя составляющая. При этом определяющее значение имеют затраты на топливо, а также на восстановление и ремонт оборудования, то есть топливная и амортизационная составляющие себестоимости вырабатываемой электроэнергии. Учет затрат на амортизацию и ремонт затруднен тем, что в настоящее время отсутствуют достоверные зависимости, связывающие их с измеряемыми технологическими параметрами. Поэтому эти виды затрат могут быть пока учтены лишь в форме ограничений на пределы изменения технологических параметров.

Таким образом, за основу частных критериев оптимальности может быть принята топливная составляющая себестоимости электроэнергии, минимум которой соответствует максимуму выражения

$$\eta_{ТУ} \eta_{П} (1 - \mathcal{E}_{СН}), \quad (1),$$

где $\eta_{ТУ}$ – КПД брутто турбоустановки; $\eta_{П}$ – КПД брутто парогенераторной установки; $\mathcal{E}_{СН}$ – относительный расход электроэнергии на собственные нужды.

Если при функционировании подсистемы оптимизации один из сомножителей (1) сохраняется постоянным, критерий можно дополнительно упростить путем исключения этого сомножителя.

При рассмотрении подсистем оптимизации в АСУ энергоблоком будем считать структуры САР и их аппаратную реализацию заданными. В общем случае состояние энергоблока характеризуется вектором управляющих воздействий q (задатчики и органы настройки регулятора), вектором изменения параметров Z (режимные параметры и параметры состояния оборудования) и вектором неизмеряемых параметров e .

Система оптимизации объекта обычно базируется на заранее заданных q и Z и основной задачей в этом случае становится синтез структуры и алгоритмов оптимального управления заданными управляющими воздействиями.

При синтезе алгоритмов оптимизации энергоблок считается или «плохо определяемым», или же «хорошо определяемым» объектом. В первом случае, например для оптимизации процесса горения, предлагаются только поисковые алгоритмы оптимизации, а во втором – строгие, заданные на значительном отрезке времени режимные оптимальные карты (РОК) или определяются косвенные параметры, которые поддерживаются на заранее заданном уровне. Недостатком первого способа являются существенные потери на поиск критерия оптимальности, иногда сводящие на нет предполагаемый эффект оптимизации. Второй способ также приводит к значительным потерям из-за неучтенных изменений в принятой модели объекта. В комбинированной системе оптимизации используют преимущества этих двух способов. Здесь поисковая система используется для коррекции модели при изменениях в технологическом процессе, при больших возмущениях или периодически через определенный интервал времени.

При построении режимной карты возможно использовать такой же подход, как и при определении статических характеристик [6]. Она по существу и является одной из статических характеристик совместно энергоблока и его САР, то есть это зависимость оптимальных управляющих воздействий от измеряемых параметров.

Из вектора q можно выделить такой вектор $\tilde{q}$, все составляющие которого обладают следующими свойствами: высокочастотные, существенно влияющие на оптимальное значение управления параметры L относятся к измеряемым, то есть $L \in Z$, а низкочастотные или несущественные влияющие параметры Ω могут быть как измеряемыми, так и неизмеряемыми.

Оценим эффективность использования РОК. Суммарные потери W_{Σ} , связанные с использованием РОК для целей оптимизации, содержат следующие составляющие:

– затраты на определение РОК и потери из-за ошибок аппроксимации неизвестной действительной зависимости – $W_{\text{ДОП}}$;

– потери, связанные с изменением Ω , то есть $W_{\text{Е}}$;

– потери из-за неточности определения оптимального значения управления на объекте (высокочастотных, существенно влияющих на оптимум управления параметров L и управляющего воздействия) – $W_{\text{ОТР}}$.

Так как аналитическое определение РОК практически невозможно, то необходим эксперимент, состоящий из внутреннего экстремального эксперимента для определения $q_{\text{ОПТ}}^*(L_1)$ (оптимального значения управляющего воздействия при

заданном фиксированном значении L_1) и полного эксперимента для построения зависимости $q_{\text{ОПТ}}(L)$ по всей области. С этими экспериментами связаны потери

$$W_{\text{ДОП}} = W'_{\text{Э}} + W_{\text{АПП}} + W_0, \quad (2)$$

где $W'_{\text{Э}}$ – потери на внутренний экстремальный эксперимент; $W_{\text{АПП}}$ – потери из-за ошибок аппроксимации РОК; W_0 – потери, связанные с проведением полного эксперимента.

Следовательно, к моменту $(t_0 + T_1)$

$$W_{\Sigma}(T_1) = W_{\text{ДОП}} + W_0(T) + W_{\text{ОТР}}. \quad (3)$$

Альтернативой использования РОК является непрерывный экстремальный эксперимент с удельными потерями $W_{\text{ЭУ}}$. Тогда потери за время T_1 равны

$$W_{\text{Э}}(T_1) = W_{\text{ЭУ}} T. \quad (4)$$

Совместное рассмотрение результатов (3) и (4) может показать, какая система является предпочтительней, а также даёт возможность определить период $T_{\text{ОПТ}}$. Для определения $T_{\text{ОПТ}}$ можно воспользоваться равенством:

$$W_{\text{ДОП}} \cong W'_{\text{Э}}(T'_0 + T_{\text{ОПТ}}) - W_{\text{Э}}(T_{\text{ОПТ}}). \quad (5)$$

То есть потери, связанные с дополнительным экспериментом, совпадут с потерями за счет низкочастотных возмущений.

Таким образом, для оптимизации режима энергоблока может быть предложена следующая структура комбинированной системы. На её верхнем иерархическом уровне находится блок календарного планирования, предназначенный для распределения времени работы энергоблока, выделенного на эксперимент между подсистемами, каждая из которых состоит из таких частей (рис. 3):

- блока переключения режимов для определения необходимости проведения специальных или корректирующих экспериментов;
- экстремального регулятора для проведения внутреннего экстремального эксперимента $q_{\text{ОПТ}}^*(L_1)$;
- режимной оптимальной карты $\varphi \begin{bmatrix} L \\ \cdot \end{bmatrix}$.

Рассмотрим в качестве примера построение подсистемы оптимизации процесса горения в топке парогенератора энергоблока ТЭС.

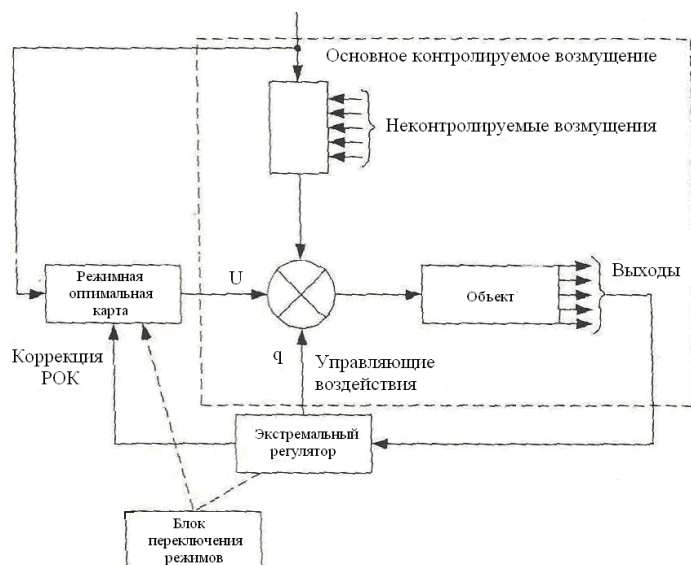


Рис. 3 – Структурная схема оптимизации

Общеизвестно, что автоматизация процесса горения в топке парогенератора оказывает существенное влияние на повышение его КПД, так как обеспечивает процесс сжигания топлива с минимальными потерями за счет одновременного воздействия на подачу топлива и воздуха, а также поддержания необходимого разрежения в топливно-воздушном тракте парогенератора. Однако, до настоящего времени из-за отсутствия возможности использования единого

критерия экономичности в САР процесса горения экономичность протекания этого процесса обеспечивалась косвенным образом по соотношению «топливо-воздух» (при сжигании газа или мазута) или «тепло-воздух» (при сжигании твердого топлива).

Благодаря использованию средств вычислительной техники в АСУ энергоблоками появилась возможность постановки и проведения ряда исследований, связанных с разработкой более современных систем управления.

В качестве примера оптимизации подсистемы АСУ энергоблоком ниже рассмотрена система оптимизации процесса горения в топке парогенератора ТГМП-204, работающего на жидком топливе в составе блока АСУ ТП 800 МВт Запорожской ТЭС.

Характерная особенность этой системы заключается в том, что она автоматически снимает статическую характеристику максимального КПД парогенератора $\eta_{ПГ}^{\max}$ и устанавливает коэффициент избытка воздуха α , соответствующий $\eta_{ПГ}^{\max}$. Процесс снятия статической характеристики периодически повторяется. В качестве критерия экономичности принят рассчитанный методом прямого баланса КПД парогенератора, учитывающий потери на работу тягодутьевых механизмов $\eta_{ПГ}^H$. Введение динамической коррекции в программу расчета критерия позволило сократить период расчета до 5 мин.

Одним из преимуществ данной системы является также возможность исключить её «зависание» в точках локального экстремума, так как при определении оптимального режима анализируются все точки экстремальной кривой, а не две-три, как в обычных поисковых системах.

Структурная схема разработанной системы оптимизации процесса горения приведена на рис. 4. Она включает в себя регулятор общего воздуха (РОВ), выполненный по типовой схеме «топливо-воздух» с коррекцией по содержанию кислорода в уходящих газах, и адаптивную модель (АМ), являющуюся автоматическим задатчиком корректора РОВ. Регулятор общего воздуха и корректор выполнен на серийной аппаратуре «Каскад» и АКЭСР. Адаптивная модель реализована

программным путем на базе управляющего вычислительного комплекса (УВК) энергоблока.

При работе АМ используются показатели работы парогенератора, рассчитанные по усредненным на 15-минутных интервалах значениям параметров энергоблока. Так как информация на входе АМ обновляется каждые 15 минут, то и алгоритм его работы разбит на 15-минутные циклы.

Адаптивная модель работает в одном из двух режимов в режиме «Поиск», либо в режиме поддержания избытка воздуха в соответствии с режимной оптимальной картой экстремального регулятора – режим «РОК». Режимная оптимальная карта представляет собой хранящуюся в памяти УВК таблицу, в которой разным диапазоном нагрузки и различным технологическим ситуациям соответствуют значения оптимальных избытков воздуха.

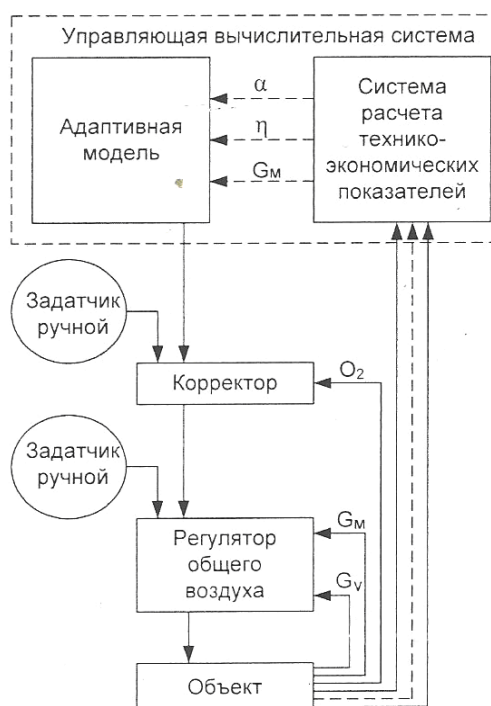


Рис. 4 – Структурная схема системы оптимизации горения: O_2 – содержание кислорода в дымовых газах; G_m – расход мазута; G_v – расход воздуха; α – коэффициент избытка воздуха в топке парогенератора; η – КПД парогенератора

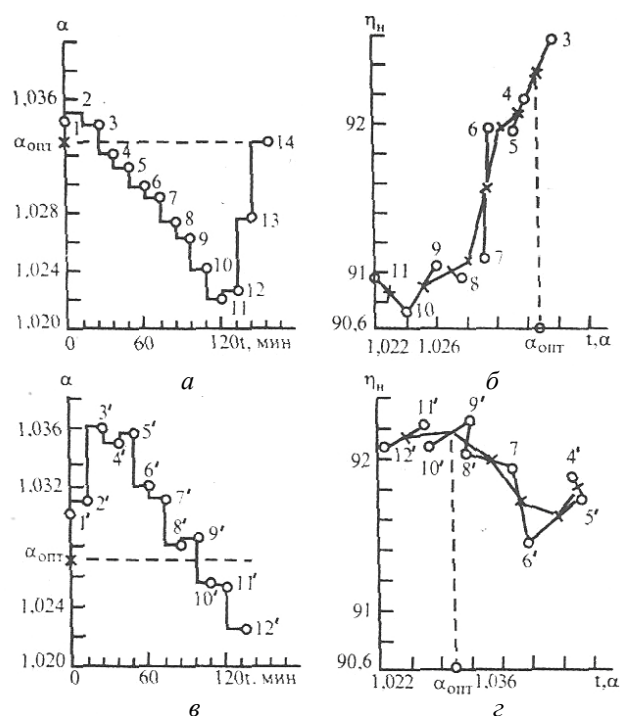


Рис. 5 – Результаты испытаний адаптивной модели на энергоблоке 800 МВт: а, б – изменение коэффициента избытка воздуха и связанная с ним зависимость $\eta(\alpha)$ в первом опыте; в, г – то же во втором опыте. Крестиками показаны точки статической характеристики после сглаживания

Задачей режима «Поиск» является отыскание избытка воздуха, при котором парогенератор работает с наибольшим КПД, то есть оптимального избытка воздуха $\alpha_{\text{опт}}$. Найденное в ходе поиска значение $\alpha_{\text{опт}}$ записывается в режимную карту АМ в графу, соответствующую определенным нагрузкам и технологическим ситуациям, при которых $\alpha_{\text{опт}}$ был получен.

Стабилизация избытка воздуха на уровне $\alpha_{\text{опт}}^{\text{рок}}$ и воздействие на корректор РОВ в режиме «РОК» производится в соответствии с И-законом регулирования.

Включение и отключение адаптивной модели, а также выбор режимов его работы осуществляется оператором энергоблока путем набора соответствующего кода

на клавиатуре станции индикации данных (СИД-100), входящей в состав УВК блока и установленной на блочном щите управления энергоблоком (БЩУ). При этом два табло на БЩУ информируют о режимах работы оптимизации процесса горения. Информация о режимах и этапах работы системы выводится каждые 15 минут на устройства технологической печати БЩУ.

На одном из блоков 800 МВт Запорожской ТЭС во время опытно-промышленной эксплуатации системы проводились специальные испытания. На рис. 5 в виде примера приведены результаты двух таких испытаний системы в режиме «Поиск». Испытания системы подтвердили её работоспособность. Была зафиксирована высокая точность поддержания оптимальных избытков воздуха при постоянных и переменных нагрузках. Техничко-экономический эффект от внедрения системы был оценен в повышении КПД парогенератора на (0,2–0,3) %.

Выводы

1) Установившиеся исходные предпосылки синтеза систем автоматического управления (САУ) не соответствуют реальным условиям эксплуатации энергоустановок и требуют учета этих условий при синтезе новых или модернизации эксплуатирующихся САУ энергоблоков ТЭС и АЭС.

2) Существующие методы теории и практики автоматического управления и информационных технологий позволяют сейчас проводить синтез оптимальных САУ на базе современных средств вычислительной техники, широко используемых в АСУ энергоблоками ТЭС и АЭС.

3) Создание и внедрение оптимальных САУ в технологические процессы энергопроизводства окажет положительное влияние на его надежностные и технико-экономические показатели.

Список литературы: 1. Дуэль, М.А. Автоматизированное управление объектами и технологическими процессами ТЭС и АЭС [Текст] / М.А. Дуэль. – Х.: ЧП «КиК», 2010. – 440 с. 2. Грицков, В.И. Опыт внедрения УВС «Комплекс-Титан» для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 [Текст] / В.И. Грицков, А.Х. Горелик, М.А. Дуэль и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 11. – С. 2-5. 3. Дуэль, М.А. Автоматизированные системы управления энергоблоками тепловых и атомных электростанций [Текст] / М.А. Дуэль. – Х.: ЧП «КиК», 2006. – 420 с. 4. Дуэль, М.А. Автоматизированные системы управления энергоблоками с использованием средств вычислительной техники [Текст] / М.А. Дуэль. – М.: Энергоиздат, 1983. – 207 с. 5. Горелик, А.Х. Система оптимизации процесса горения для котла энергоблока 800 МВт [Текст] / А.Х. Горелик, М.А. Дуэль, В.Н. Солодовников и др. // Теплоэнергетика. – 1980. – № 5. – С. 50-54. 6. Дуэль, М.А. Применение ЭВМ для определения энергетических характеристик энергооборудования ТЭС [Текст] / М.А. Дуэль Б.Л. Соляник, А.И. Шульман. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2014