

На правах рукописи

**Кинаш Александр Викторович**

**Корреляционно-экстремальная система управления котлами  
на основе текущих оценок КПД  
/в металлургическом производстве/**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» в ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Казаринов Л.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Панферов В.И.

кандидат технических наук, доцент Андреев С.М.

Ведущая организация – ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» филиал УралВТИ

Защита состоится 29 июня 2011 г. в 16-00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 ГОУ ВПО «Южно - Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.03; факс: (351) 267-94-88; e-mail: nseg@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «28» мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.298.03 при Южно-Уральском  
государственном университете, д.т.н.



С.Г. Некрасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Предприятия металлургической отрасли промышленности являются крупными потребителями энергетических ресурсов в РФ. Поэтому в соответствии с Законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №261-ФЗ от 23.11.2009г. металлургические предприятия обязаны проводить активную политику энергосбережения.

Металлургические предприятия, как правило, имеют в своем составе тепловые электрические станции, которые наряду с природным газом потребляют в качестве топлива для энергетических котлов вторичные энергоресурсы (ВЭР) и иные виды топлива. Утилизация вторичных энергетических ресурсов в металлургическом производстве решает важную задачу энергосбережения, так как при этом сокращается потребление природного газа. Эффективное решение данной задачи усложняется следующими факторами. В связи с технологическими особенностями доменного производства параметры доменного газа (давление, калорийность) значительно меняются во времени, что вносит существенные возмущения в режимы работы энергетических котлов станций.

Исследованию процессов автоматизированного управления котельными агрегатами в динамических режимах при воздействии возмущающих факторов в настоящее время посвящено множество работ. Существенный вклад в решение данной проблемы содержится в работах Андреева С. М., Веникова В. А., Казакевича В. В., Казаринова Л. С., Кузеванова В. С., Лисиенко В. Г., Парсункина Б. Н., Плетнева Г. П., Полякова А. А., Ротача В. Я., Шевчука В. П., Шмелева Н. В. и др. Общие вопросы построения систем автоматической оптимизации технологических процессов были исследованы в работах Арефьева Б. А., Дрейпера Ч., Ивахненко А. Г., Казакевича В. В., Красовского А. А., Кунцевича В. М., Ли И., Либерзона Л. М., Матвейкина В. Г., Медведева Г. А., Моросанова И. С., Муромцева Д. Ю., Перре Р., Растригина Л. А., Родова А. Б., Рукселя Р., Тарасенко В. П., Хамзы М., Элена Ж. и др.

Типовыми подходами к решению данной проблемы являются:

-использование газоаналитических приборов в качестве первичных измерительных датчиков в контурах регулирования подачи воздуха;

-использование адаптивных систем управления по показателям эффективности топочных процессов и др.

Для рассматриваемого класса систем управления применение газоаналитических приборов усложняется тем, что вторичные энергетические ресурсы содержат в своем составе нежелательные компоненты, которые приводят к ускоренному износу первичных приборов и выходу их из строя. Научная методика

большинства работ по адаптивным системам управления основывается на использовании в качестве целевой функции управления косвенных показателей эффективности топочных процессов. Это связано с тем, что измерение текущего КПД топочных процессов в условиях высокого уровня помех представляет собой некорректно поставленную задачу идентификации. При этом наличие случайных возмущений приводит к большим ошибкам оценивания и, как следствие, к снижению точности и быстродействия контура адаптивного управления.

Кроме того, утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) металлургического производства в виде доменного и (или) коксового газов ставит дополнительную задачу максимальной утилизации ВЭР, которая в литературе рассмотрена недостаточно.

В этой связи является актуальной задача построения адаптивных систем управления топочными процессами по критерию максимума КПД для энергетических котлов, в которых утилизируются ВЭР металлургического производства. При этом для повышения быстродействия системы управления в работе предлагается использовать корреляционно-экстремальные системы, использующие текущие оценки КПД топочных процессов, которые позволяют повысить эффективность использования топлива в переменных режимах.

### **Цель диссертационной работы и задачи исследования.**

Целью диссертационной работы является разработка методов построения корреляционно-экстремального управления энергетическими котлами, утилизирующими ВЭР металлургического производства, на основе использования текущих оценок КПД топочных процессов.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие задачи исследовательского и прикладного характера:

- 1) Проведение анализа режимов работы энергетических котлов электрических станций металлургического производства с целью выявления резервов повышения эффективности использования топлива в условиях вариаций параметров режимов, обусловленных утилизацией ВЭР и резко переменной нагрузкой.

- 2) Разработка методов и алгоритмов корректного построения текущих оценок КПД в энергетических котлах металлургического производства.

- 3) Разработка методов и алгоритмов корреляционно-экстремального управления режимами энергетических котлов электрических станций металлургического производства по критерию максимального КПД топочных процессов и максимального потребления ВЭР.

4) Опытная реализация системы корреляционно-экстремальной системы управления на примере электрических станций открытого акционерного общества «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»).

5) Проведение анализа эффективности разработанной корреляционно-экстремальной системы управления на основе данных опытной эксплуатации.

### **Связь диссертации с федеральными и региональными программами.**

Диссертационное исследование выполнялось в соответствии со следующими законодательными и нормативно-правовыми документами:

- Законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №261-ФЗ от 23.11.2009 г;

- Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (в ред. Постановлений Правительства РФ от 18.08.2007 N 531, от 19.11.2008 N 857, от 27.01.2009 N 62, от 06.04.2011 № 253);

- «Основными направлениями энергосбережения в Челябинской области до 2010 года», утвержденными постановлением Губернатора Челябинской области от 26.03.2003г. №112.

**Предметом исследования** являются автоматизированные системы управления режимами энергетических котлов электрических станций металлургического производства.

**Объектом исследования** являются энергетические котлы электрических станций металлургического производства, утилизирующие вторичные энергетические ресурсы.

**Методы исследования.** Теоретической и методической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых по управлению технологическими процессами в металлургии и энергетике. В работе использовались методы теории автоматизированного управления, автоматического регулирования, автоматизированных информационных систем, математической статистики, теории корреляционно-экстремальных систем. Источником экспериментальных данных явились результаты натурных испытаний автоматизированных систем управления процессом горения на энергетических котлах электростанции ОАО «ММК».

**Научная новизна диссертационной работы.** В ходе исследования были получены следующие научные результаты:

1) Разработаны новый метод и алгоритм построения текущих оценок КПД топочных процессов в энергетических котлах электрических станций металлургического производства.

2) Разработаны новый метод и алгоритм корреляционно-экстремального управления режимами энергетических котлов электрических станций металлургического производства с использованием текущих оценок КПД топочных процессов.

**Практическое значение.** Применение разработанной корреляционно-экстремальной системы управления топочных процессов энергетических котлов электрических станций металлургического производства позволяет снизить потребление природного газа при использовании вторичных энергетических ресурсов. Выполненные в рамках диссертационной работы методические, алгоритмические и аппаратные разработки были реализованы на энергетическом котле ст.№5 Центральной электростанции ОАО «ММК». На способ автоматической коррекции процессов горения с целью минимизации потребления природного газа в топке барабанного парового котла подана заявка на выдачу патента РФ на изобретение №2009139582, 01.02.2011г. получено уведомление о выдаче патента на изобретение. В настоящее время реализуется перспективная программа мероприятий по дальнейшему внедрению разработанной системы, подписанная исполнительным директором ОАО «ММК» и утвержденная распоряжениями по ОАО «ММК» ИД-460 от 28.07.2008 и ИД-691 30.10.2009 «О внедрении автоматизированной системы контроля процесса сжигания топлива на котлоагрегатах ЦЭС».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на Международных научно-технических конференциях молодых специалистов, проходивших на базе ОАО «ММК» в 2009, 2010 и в 2011 году, на 2-й международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства» секция Автоматизация и роботизация (г. Тамбов 19-20 мая 2009 г.), на 4-ой международной научно-технической конференции "Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И.Вернадского" (г. Тамбов 25-26 сентября 2009 г). Материалы диссертационной работы были также доложены на 67-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2008-2009 годы, МГТУ, Магнитогорск.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе получено положительное решение по заявке на получение патента на изобретение №2009139582. 3 статьи опубликованы в изданиях по списку ВАК, а также издано в соавторстве учебное пособие «Автоматизированные

информационно-управляющие системы» в 2-х частях (294 стр.) и монография «Автоматизированные системы управления в энергосбережении» (228 стр.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 130 страницах. Диссертация содержит 49 рисунков, 29 таблиц и 4 приложения. Список литературы включает 105 наименований.

**На защиту выносятся:**

1) Метод и алгоритм построения текущих оценок КПД топочных процессов в энергетических котлах электрических станций металлургического производства.

2) Метод и алгоритм корреляционно-экстремального управления режимами энергетических котлов электрических станций металлургического производства по критерию максимального КПД топочных процессов и максимального потребления ВЭР.

3) Схема автоматизации котла, отличающаяся от известных схем подсистемой автоматической корреляционно-экстремальной коррекцией процесса горения по критерию максимума КПД топочных процессов и максимального потребления ВЭР.

## **Основное содержание работы**

### **Анализ задач и проблем регулирования режимов котельных агрегатов по критерию тепловой экономичности.**

В настоящее время особенностью эксплуатации энергетических котлов электрических станций металлургических производств, в частности для ОАО «ММК», является использование смеси топлив с нестабильными характеристиками. Так, в энергетических котлах ОАО «ММК» наряду с природным газом в качестве топлива используется доменный газ, коксовый газ и другие вторичные газы, сопутствующие процессу выплавки чугуна и спеканию кокса. В этих условиях для обеспечения экономичности использования топлива необходимо использовать специальные системы автоматического регулирования экономичности процессов горения. Задача повышения экономичности процесса горения в топке барабанного парового котла является одной из центральных технических задач, решению которой посвящена обширная литература. Общие принципы управления барабанными паровыми котлами были заложены в 50-е – 60-е годы прошлого столетия. На основе указанных принципов построена в настоящее время система автоматического регулирования нагрузки котлов Центральной электростанции

(ЦЭС) ОАО «ММК». Данная система в течение всего периода эксплуатации показала свою высокую надежность и эффективность. Однако в современных условиях значительно повысились требования к экономичности процесса горения, что связано с повышением цен на природный газ и увеличением штрафа за выброс продуктов горения выше нормативного. Поэтому является актуальной задача введения в существующую систему автоматического регулирования нагрузки котлов дополнительного контура адаптивного управления, повышающего КПД топки котла, и контура регулирования, повышающего долю использования ВЭР.

Типовым подходом к регулированию экономичности топочных процессов является коррекция подачи воздуха по содержанию кислорода ( $O_2$ ) в дымовых газах. Однако содержание  $O_2$  не является постоянным в процессе эксплуатации и зависит от множества факторов. Данные факторы снижают точность определения максимального КПД. Поэтому коррекцию по  $O_2$  следует считать допусковой коррекцией, которая приводит режим работы котла в соответствие с требованиями режимной карты. Оптимальная коррекция режима работы котла должна обеспечить его максимальный КПД. Достижение максимального КПД котла возможно лишь на основе применения систем экстремального регулирования. Это связано с тем, что в котлах, например ЦЭС, сжигается доменный газ, параметры которого (давление, калорийность) являются переменными. Так, для доменного газа отклонение давления составляет  $\pm 35\%$ , калорийность может изменяться в пределах 800-870 ккал/кг. Поэтому работа по статической режимной карте не может обеспечить экономичный режим работы котла.

На экономичность работы котла влияет множество факторов: паровая нагрузка котла; калорийность и давление доменного газа; потеря тепла с уходящими газами; тепло, вносимое с питательной водой и воздухом; подсосы и выбивания по контуру котла и в газоходах.

В связи со сказанным в данной работе проведен обзор методов экстремального регулирования применительно к сжиганию смеси топлив с нестабильными характеристиками в энергетических котлах электрических станций. На основе выявления тенденции развития методов экстремального регулирования предложен оригинальный подход к построению корректирующего регулятора на основе метода корреляционно-экстремального регулирования с текущей оценкой КПД топки согласно характеристик процессов горения топлива. Подобный подход позволяет вести оценку текущего значения КПД брутто котла и производить оперативное регулирование экономичности режимов работы котла.

### **Система автоматического регулирования режимных параметров котла**

Общая схема системы автоматического регулирования для блока энергетических котлов представлена на рис. 1.

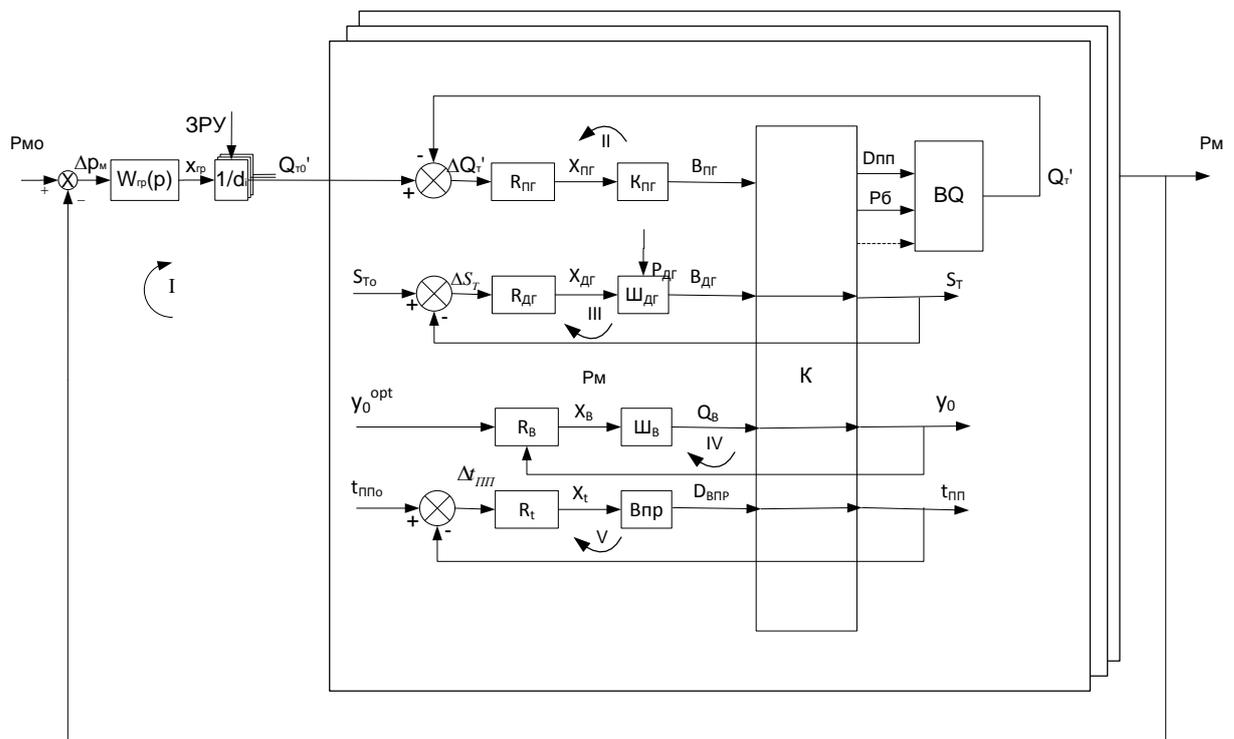


Рис. 1. Общая схема системы автоматического регулирования блоком КОТЛОВ

Здесь  $p_m$  – давление пара в общей магистрали, к которой подключены потребители пара;  $p_{m0}$  – уставка давления пара в магистрали;  $\Delta p_m$  – сигнал рассогласования по давлению в магистрали;  $Q_{m0}'$  – задание нагрузки котла от главного регулятора;  $Q_m'$  – тепловыделение в топке;  $\Delta Q_m'$  – сигнал ошибки по нагрузке;  $S_{т0}$  – задание разрежения в топке,  $y_0^{opt}$  – задание содержания кислорода в дымовых газах,  $t_{пп0}$  – задание температуры перегретого пара;  $S_t$  – разрежение в топке,  $y_o$  – содержание кислорода в дымовых газах,  $t_{пп}$  – температура перегретого пара;  $\Delta S_t$  – сигнал ошибки по разрежению в топке,  $\Delta y_o$  – сигнал ошибки по содержанию кислорода в дымовых газах,  $\Delta t_{пп}$  – сигнал ошибки по температуре перегретого пара;  $x_{пг}$ ,  $x_{дг}$ ,  $x_в$ ,  $x_t$  – регулирующие воздействия на устройства подачи природного газа, доменного газа, воздуха и впрыска конденсата соответственно;  $V_{пг}$  – расход природного газа;  $V_{дг}$  – расход доменного газа;  $Q_в$  – расход воздуха;  $D_{вп}$  – впрыск конденсата;  $R_{пг}$ ,  $R_{дг}$ ,  $R_в$ ,  $R_t$  – регулятор природного газа, доменного газа, воздуха и температуры перегретого пара соответственно;  $K_{пг}$  – клапан природного газа;  $Ш_{дг}$ ,  $Ш_в$  – шибер доменного газа и воздуха соответственно;  $В_{пг}$  – устройство впрыска;  $x_{зр}$  – управляющее воздействие от главного регулятора;  $d_i$  – доля нагрузки  $i$ -ой котельной установки, задаваемая главным регулятором в общей нагрузке блока котлов;  $I$  – контур регулирования давления по магистрали;  $II$  – контур локального регулирования по тепловой нагрузке отдельного котла;  $III$  – контур локального регулирования по разрежению в топке;  $IV$  – контур локального регулирования по кислороду;  $V$  – контур локального регулирования по температуре перегретого пара;  $ЗРУ$  – задатчик ручного управления;  $W_{зр}(p)$  – передаточная функция главного регулятора;  $BQ$  – вычислитель сигнала  $Q_m'$ .

Для барабанных котлов вычисление сигнала  $Q_T'$  осуществляется в соответствие с формулой, известной из теории систем автоматического регулирования рассматриваемого класса:

$$\dot{Q}_T = \frac{1}{A_1} \frac{dp_{\delta}}{dt} + (D_{\delta} h'' - W_{н.в.} h''_{в.э.}) - A_2 (D_{\delta} - W_{н.в.}). \quad (1)$$

Здесь  $p_{\delta}$ ,  $D_{\delta}$ ,  $h''$  - давление, расход и энтальпия пара барабана котла,  $W_{п.в.}$  - расход питательной воды,  $h_{в.э.}$  - энтальпия воды экономайзера,  $A_1$  и  $A_2$  – настроечные коэффициенты применительно к конкретному котлу.

Непосредственно процессы регулирования осуществляет регулятор подачи природного газа с передаточной функцией  $W_{пг}$  и регулятор подачи воздуха  $W_{рв}$ ,  $Q_{T0}'$  – задание по теплоте. Задание по воздуху  $Q_{в0}$  определяется на основе задания по теплоте

$$Q_{в0} = f_{в}(Q_{T0}'). \quad (2)$$

Использование вторичных энергоресурсов 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 максимальным открытием шиберов доменного газа при удержании системой автоматической регулирования необходимого уровня разрежения в топке (контур регулирования III). Производительность дымососа котла в этом случае устанавливается на предельно допустимом значении. Подобный подход позволяет эффективно увеличить объем потребляемого доменного газа, так как ограничивающим фактором здесь является уровень разрежения в топке. При этом контур регулирования доменного газа (III) использует перекрестную связь объема потребляемого доменного газа и разрежения в топке.

### **Адаптивная система коррекции подачи воздуха по критерию максимума КПД процессов горения**

Составной частью рассматриваемой системы управления экономичностью потребления топлива является адаптивная система коррекции подачи воздуха по критерию максимума КПД процессов горения. Общая структура адаптивной системы приведена на рис. 2.

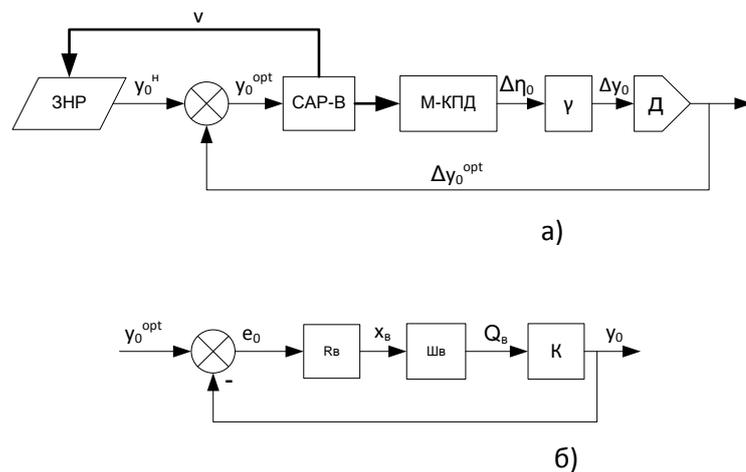


Рис. 2

Здесь *ЗНР* – блок задания номинального режима по кислороду  $O_2$  на выходе котла,  $y_0^H$  – номинальное процентное содержание кислорода в дымовых газах,  $v$  – вектор режимных параметров, компонентами которого являются величины  $D_{mn}$  – выработка перегретого пара (т/ч), *САР-В* – система автоматического регулирования подачи воздуха (рис. 2, б), *М-КПД* – программа «Монитор-КПД», оценивающая приращение КПД  $\Delta\eta_0$  при изменении подачи воздуха,  $\gamma$  – коэффициент, определяющий скорость адаптации системы автоматического регулирования по критерию максимума КПД, *Д* – дискретный интегратор, вычисляющий оптимальную коррекцию задающего воздействия  $y_0^H$  по критерию максимума КПД.

Система автоматического регулирования подачи воздуха (рис. 2, б): здесь  $y_0^{opt}$  – задание по процентному соотношению кислорода в дымовых газах,  $R_в$  – регулятор подачи воздуха,  $x_в$  – угол открытия шибера в процентах, *Ш\_в* – шибер воздуха,  $Q_в$  – количество воздуха, подаваемое в топку котла,  $y_0$  – процентное содержание кислорода в дымовых газах,  $e_0$  – ошибка регулирования по кислороду, *К* – котел.

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 режимов 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. Для расчета величины коррекции используется специальная программа «Монитор-КПД», разработанная в рамках данной работы. Программа «Монитор-КПД» на основе обработки текущих значений режимных параметров

котла определяет отклонение КПД котла при отклонениях подачи воздуха. Тем самым определяется направление, в котором необходимо изменять подачу воздуха, чтобы обеспечить максимальный КПД котла. Так как текущая информация, поступающая с «Монитор-КПД», носит случайный характер, то она интегрируется с весом  $\gamma$  в специальном блоке  $D$ . В результате вычисляется текущая средняя величина коррекции сигнала задания по воздуху. Если переходные процессы в контуре адаптации сходятся, то математическое ожидание выходного сигнала программы «Монитор-КПД» будет равно нулю. Это является необходимым условием достижения максимума КПД в системе. При данном условии величина коррекции задающего сигнала будет являться оптимальной и соответствовать условию максимума КПД котла. После того, как во внешнем контуре адаптации получен оптимальный задающий сигнал по кислороду, система автоматического регулирования по воздуху отрабатывает в следящем режиме оптимальное задание по кислороду.

### 1. Методика текущей оценки КПД топочных процессов

КПД котла оценивается величиной

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

где  $Q'$  - 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.

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  $Q'(t)$ ,  $Q_{\text{вх}}(t)$ :

$$Q_{\text{вх}}(t) = B_{\text{нр}}(t)Q_{\text{н}}^{\text{нр}}(t) + \sum_i B_i(t)Q_{\text{н}}^i(t), \quad (5)$$

где  $B_{\text{нр}}(t)$ ,  $B_i(t)$  - текущие объемы расхода природного газа и вторичных энергетических ресурсов соответственно;  $Q_{\text{н}}^{\text{нр}}(t)$ ,  $Q_{\text{н}}^i(t)$  - 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

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

Смысл экстремальной задачи (7) состоит в том, что на ее основе по параметру  $\tau$  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  $M_{\tau}(\cdot)$  - оператор текущего усреднения, который в дискретном варианте имеет вид:

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

где  $N$  - число дискретных шагов усреднения.

Соответствующий коэффициент корреляции

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

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

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

где среднее значение КПД определяется формулами:

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

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

$$Q_{\text{вх}, \text{ср}}(t) = M_{\tau}\{Q_{\text{вх}}(t)\}, \quad (13)$$

Влияние режимных факторов будем оценивать на основе соотношения

$$\Delta \eta_{\tau} = \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial Q_{ex}(t-\tau)} \Delta Q_{ex}(t-\tau) + \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial P_g(t-\tau)} \Delta P_g(t-\tau), \quad (14)$$

где  $\Delta Q_{ex}(t)$  – отклонение входного теплового потока от среднего значения;

$\Delta P_g(t)$  – отклонение давления воздуха от среднего значения.

Соотношение (14) можно записать в общем виде

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

где  $a_1$  – относительный коэффициент влияния отклонений подачи топлива на КПД

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

$a_2$  – относительный коэффициент влияния отклонений подачи воздуха на КПД

$$a_2 = \frac{\partial \eta_{\tau}}{\partial P_g(t-\tau)},$$

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

$$x_1 = \Delta Q_{ex}(t),$$

$$x_2 = \Delta P_g(t).$$

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  $c_{11} = M \{x_1^2\}$ ,  $c_{12} = c_{21} = M \{x_1 x_2\}$ ,  $c_{22} = M \{x_2^2\} + \lambda$ ,  $d_1 = M \{y x_1\}$ ,  $d_2 = M \{y x_2\}$ ,

$\lambda$  – параметр регуляризации.

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

– нормированный коэффициент влияния отклонения подачи топлива на КПД котла

$$R_{\tau} = a_1 \frac{\sigma_{\Delta Q_{ex}}}{\sigma_{\Delta \eta_{\tau}}}, \quad (17)$$

– нормированный коэффициент влияния отклонения подачи воздуха на КПД котла

$$R_{\nu} = a_2 \frac{\sigma_{\Delta P_e}}{\sigma_{\Delta \eta_{\tau}}}, \quad (18)$$

где  $\sigma_{\Delta Q_{ex}}$ ,  $\sigma_{\Delta P_e}$ ,  $\sigma_{\Delta \eta_{\tau}}$  – средние квадратические отклонения, определяемые по соотношениям

$$\sigma_{\Delta Q_{ex}} = \sqrt{M_t \{ \Delta^2 Q_{ex} \}}, \quad \sigma_{\Delta P_e} = \sqrt{M_t \{ \Delta^2 P_e \}}, \quad \sigma_{\Delta \eta_{\tau}} = \sqrt{M_t \{ \Delta^2 \eta_{\tau} \}}.$$

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 – наличие обратной связи 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).

Градация по величине от «-1» до «1» показывает, 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. 3, 4.

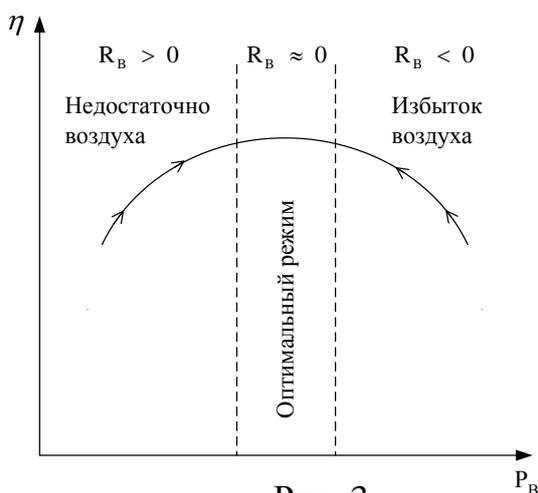


Рис. 3

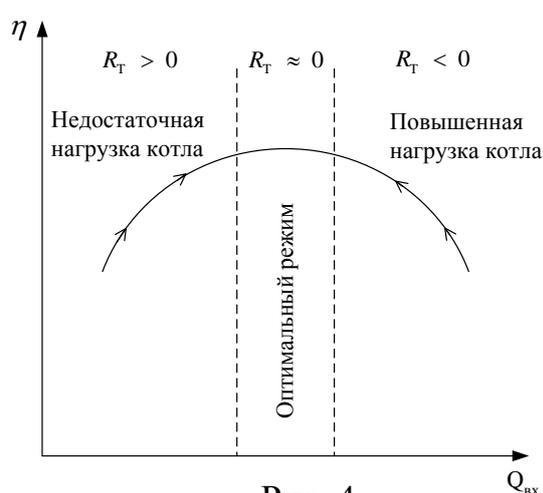


Рис. 4

Здесь  $\eta$  – КПД котла;  $Q_{вх}$  – тепло, вносимое в топку котла с топливными газами;  $R_T$  – коэффициент влияния отклонения подачи топлива на КПД котла;  $P_B$  – давление воздуха;  $R_B$  – коэффициент влияния отклонения подачи воздуха на КПД котла;  $\rightarrow$  – направление движения к оптимальному режиму.

Величины коэффициентов, показывающих влияние отклонений подачи топлива и воздуха на КПД котла, служат критериями оптимальности процессов горения в топке 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 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.

## 2. Особенности вычисления текущих оценок КПД

Изложенный выше подход к корреляционно-экстремальному управлению котельными установками на основе оперативной оценки текущего КПД имеет следующие особенности.

Так, КПД может быть вычислен как статистически средняя величина:

$$a_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}}},$$

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

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

Среднестатистическая оценка не может быть использована для оперативной оценки КПД, так как имеет большое запаздывание на время усреднения.

Оперативную оценку КПД 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<sup>0</sup>. Условие несмещенности. Оценки  $V^*(t)$ ,  $P^*(t)$  должны быть несмещенными в том смысле, что для них выполняются равенства

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

2<sup>0</sup>. 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<sup>0</sup>. 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<sup>0</sup>. Условие независимости измерений. Оценки  $V^*(t)$ ,  $P^*(t)$  должны быть получены на основе независимых измерений.

5<sup>0</sup>. 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  $Q_{\text{вых}}$ , а тепловыделение в топке  $Q_{\text{т}}$ , оцениваемое на основе обратного динамического оператора (1). Хотя упреждаемость в полном смысле слова здесь не достигается, однако оценка  $Q_{\text{т}}$  обладает значительно большим быстродействием по сравнению с оценкой  $Q_{\text{вых}}$ . Синхронизация обеспечивается условиями (6), (7). Независимость измерений следует из определения текущего КПД, где величины  $Q_{\text{т}}$  и  $Q_{\text{вх}}(t-\tau(t))$ . Помехоустойчивость оценки может быть обеспечена, если, например, все вычисления на фоне помех производятся с использованием экспоненциальных цифровых фильтров.

Таким образом, приведенный 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.

### **Реализация систем оптимального управления по критерию тепловой экономичности на котельном агрегате в рамках АСУ ТП.**

Все функции оптимального управления по критерию тепловой экономичности на котельном агрегате выполняются корректирующим регулятором. Порядок работы функциональных блоков и логические связи между ними задаются параметрами при конфигурировании контроллера. Пользователь (наладчик) определяет структуру алгоритма работы контроллера и выполняемые функции, изменяя значения параметров.

Обобщенная функциональная схема контроллера, работающего в составе системы автоматического регулирования, приведена на рис. 5.

Все алгоритмы автоматического регулирования, предусмотренные в контроллере изготовителем, выполняются по циклическому принципу, предполагающему три этапа: опрос датчиков, вычисление управляющих воздействий, формирование управляющих воздействий на дискретных выходах. Базовое время цикла работы регулятора составляет 1 секунду. Вся информация,

поступающая с датчиков, проходит контроль и нормирование с использованием соответствующих блоков.

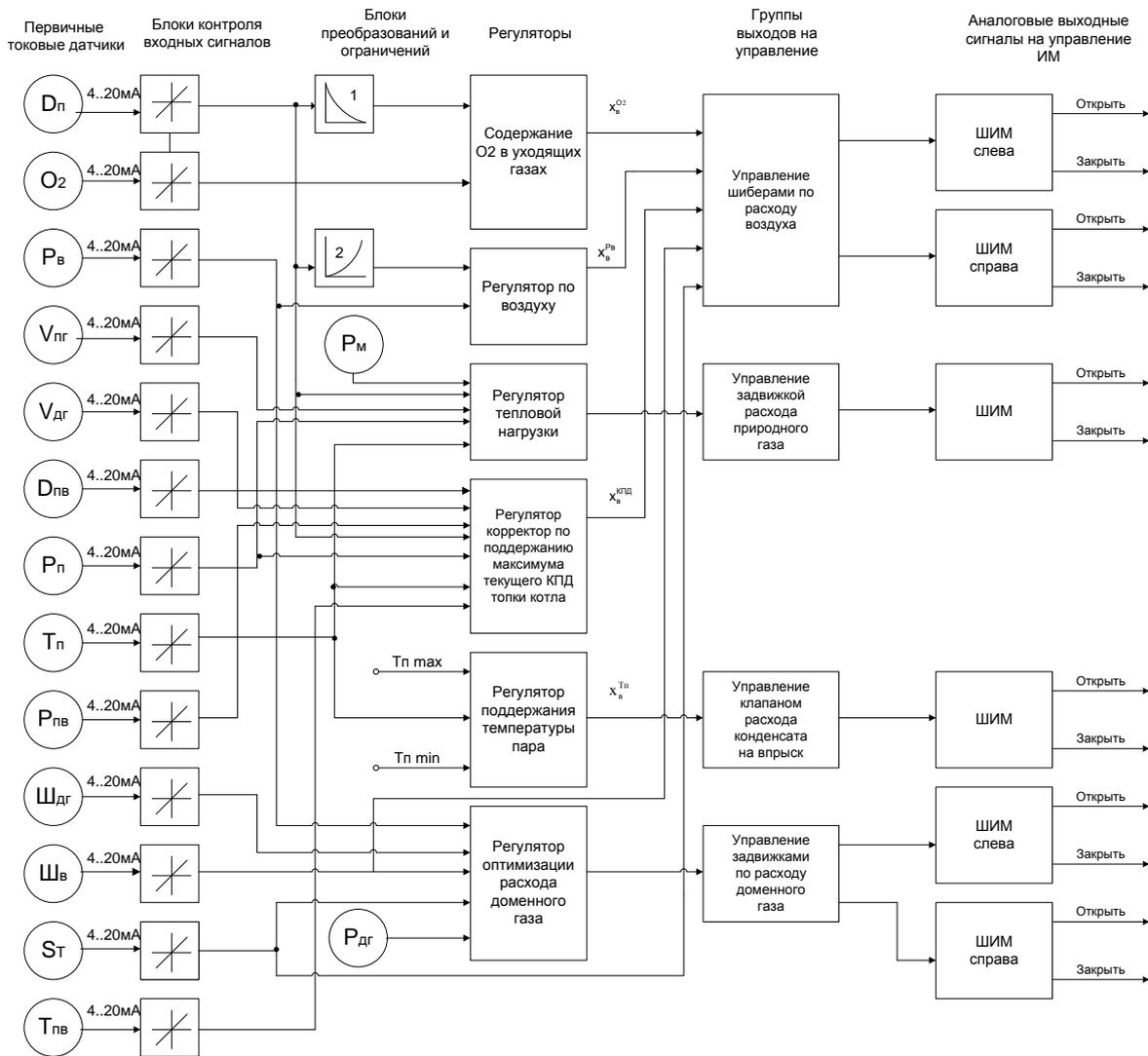


Рис. 5. Обобщенная функциональная схема контроллера корректирующего регулятора в составе САР котла

На функциональной схеме (см. рис. 5) приняты следующие обозначения:  $D_{п}$  – расход пара;  $O_2$  – содержание кислорода в уходящих газах;  $P_{в}$  – давление воздуха;  $O_2^*$ ,  $P_{в}^*$  – соответственно содержание кислорода в уходящих газах и давление воздуха, определяемые согласно режимной карте в зависимости от нагрузки котла;  $V_{пг}$  – расход природного газа;  $V_{дг}$  – расход доменного газа;  $D_{пв}$  – расход питательной воды;  $P_{п}$  – давление пара;  $Ш_{дг}$  – положение шиберов доменного газа;  $Ш_{в}$  – положение шиберов по воздуху;  $T_{пв}$  – температура питательной воды;  $P_M$  – давление пара в главной паровой магистрали;  $T_{п}$  – температура пара;  $S_T$  – разрежение в топке;  $P_{дг}$  – давление доменного газа;  $T_{п, min}$  – заданное минимальное значение температуры пара;  $T_{п, max}$  – заданное максимальное значение температуры пара;  $P_{пв}$  – давление питательной воды;  $x_e^{O_2}$  – сигнал подачи воздуха по содержанию  $O_2$  в уходящих газах;  $x_e^{P_{в}}$  – сигнал подачи воздуха по давлению воздуха;  $x_e^{КПД}$ ,  $\Delta x_e^{КПД}$  – соответственно сигнал подачи воздуха и коррекции подачи воздуха по КПД;  $x_e^{T_{п}}$  – сигнал подачи воздуха по температуре пара;  $x_e$  – сигнал, подаваемый на входы блоков формирования управляющих сигналов исполнительным механизмом (блоки ШИМ); ИМ – исполнительный механизм.

Связи между функциональными блоками, приведенные на рис. 5, подчиняются следующим принципам:

1) любое количество регуляторов может быть подключено к одной группе выходов (если требуется регулировать одновременно две и более переменных одним регулирующим органом);

2) любое количество выходов контроллера (аналоговых, дискретных, силовых) может быть подключено к одной группе выходов (применяется при установке параллельно нескольких регулирующих органов).

В пользовательском интерфейсе конфигурирования контроллера все связи представляются в виде ссылок. При выборе соответствующего пункта меню, отвечающего за связь, которую необходимо установить, пользователю предлагается список элементов (датчиков, регуляторов, групп выходов и т.д.), которые можно назначить данной связи.

Связи могут определяться в источнике или в приёмнике. При этом независимо от способа задания связи направление передачи сигнала всегда соответствует направлению стрелки у связи.

В пользовательском интерфейсе конфигурирования контроллера для разных типов связей приняты различные способы задания, при этом обычно предусмотрен только один способ: либо в источнике, либо в приёмнике. Способ задания определяется типом связи: от одного ко многим или от многих к одному. В общем случае работает следующий принцип: если связь от многих к одному (например, несколько датчиков могут быть назначены одному регулятору), то связь задается в источниках сигнала (в датчиках); если же связь от одного ко многим (например, одна группа выходов может быть подключена к нескольким выходам), то связь задается в приемниках сигнала (в выходах).

## Основные выводы и результаты

1. Особенностью эксплуатации энергетических котлов электрических станций металлургических предприятий является использование смеси топлив с нестабильными характеристиками. Так, в энергетических котлах Центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК» наряду с природным газом в качестве топлива используется доменный газ, для которого отклонение давления составляет  $\pm 35\%$ , отклонение калорийности может достигать  $5\%$ . Кроме давления и калорийности доменного газа, дестабилизирующим фактором являются также колебания нагрузки, определяемые технологическими процессами металлургического производства, и др. Нестабильность параметров режимов топочных процессов обуславливает снижение КПД котлов. Экспериментальные исследования показали, что вследствие воздействия указанных дестабилизирующих факторов КПД котлов снижается в среднем на  $3\%$  и более.

2. Разработаны метод, алгоритмическое и программное обеспечение оперативной оценки КПД топочных процессов энергетических котлов, удовлетворяющей условиям несмещенности, упреждаемости, независимости и синхронности измерений составляющих компонент оценки, помехоустойчивости. Программное обеспечение основывается на современных алгоритмах цифровой фильтрации, обеспечивающих на фоне помех вычисление достаточно точной оценки текущего КПД топочных процессов и влияние на КПД действующих факторов.

3. Разработаны метод, алгоритмическое и программное обеспечение корреляционно-экстремального управления режимами энергетических котлов электрических станций металлургического производства по критериям максимума текущего КПД топочных процессов и максимального объема потребления ВЭР.

4. С использованием указанного алгоритмического и программного обеспечения разработана и внедрена на ЦЭС ОАО «ММК» автоматизированная система мониторинга и регулирования экономичности использования топлива. На данную систему получено положительное решение по заявке на патент РФ «Способ автоматической оптимизации процесса горения в топке барабанного парового котла» №2009139582.

5. На ЦЭС ОАО «ММК» установлен опытный образец корректирующего регулятора, осуществляющий коррекцию подачи воздуха в паровой котел ст. №5 в зависимости от текущей подачи топлива (доменный, природный газ) по критерию максимума текущего КПД котла.

6. Экспериментальная проверка разработанной автоматизированной системы мониторинга и регулирования экономичности использования топлива, в состав которой входит корректирующий регулятор подачи воздуха, показала ее

эффективность. Резерв повышения КПД процессов горения составил не менее 3%. Увеличился объем потребления ВЭР до 10 % в зависимости от режима подачи ВЭР.

*По теме диссертации опубликованы следующие работы.*

1. Казаринов Л.С., Игнатова Т.А., Кинаш А.В., Колесникова О.В., Шнайдер Д.А. Оперативное регулирование экономичности горения в энергетических котлах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8, №17 (117). – С. 21 – 23.

2. 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.

3. Кинаш А.В. Автоматизированная система мониторинга показателей энергетической эффективности паровых котлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11, №2 (178). – С. 79 – 80.

4. Кинаш А.В., Казаринов Л.С. Оптимизация процесса горения в топке барабанного парового котла работающего в переменных режимах с оптимальной коррекцией по КПД // Сборник тезисов докладов IX международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ММК» г. Магнитогорск 2009г. С. 110 – 111.

5. Кинаш А.В., Казаринов Л.С. Многосвязная система оптимального регулирования экономичности потребления топлива для энергетических котлов электрических станций // Сборник тезисов докладов X международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ММК» г. Магнитогорск 2010г. С. 98 – 100.

6. Кинаш А.В., Шнайдер Д.А. Подход к оптимизации режимов работы котельного агрегата по текущему КПД // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства», г. Тамбов, 19-20 мая 2009. – С. 82–83.

7. Кинаш А.В., Шнайдер Д.А. Анализ режимов работы котлоагрегатов электростанции при использовании адаптивной системы оптимизации процессов горения в топке // «Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского». Сборник материалов 4-ой Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Изд-во ТАМБОВПРИНТ, 2009. С. 205–207.

8. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография // под. Ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; издатель Т. Лурье, 2010. – 228 с., ил. Авторы Кинаш А.В. Шнайдер Д.А. и т.д. С.39 – 86

9. Казаринов Л.С. Кинаш А.В. Способ экстремальной автоматической системы регулирования процессами горения в топке парового котла при использовании смеси газов // Материалы 67-й научно-технической конференции. сб. докл.: Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009, Т.2. 223с, С. 138 – 139

10. Кинаш А.В. Регулирование экономичности горения в энергетических котлах. Учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1: Автоматизированные информационно-управляющие системы. / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Т.А. Барбасова – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 294 с. С. 223 – 228.

11. Кинаш А.В., Казаринов Л.С. Корреляционно-экстремальная система управления котлами на основе упреждающих оценок КПД (в металлургическом производстве) // Сборник тезисов докладов XI международной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ММК» г. Магнитогорск 2011г. С. 85 – 87.

12. Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А., Канашев Е.А., Кинаш А.В. Математическая модель теплоэнергетической системы ТЭС металлургического предприятия // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 5 апр. 2010 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 71-76.

13. Кинаш А.В., Рябчиков М.Ю. Расчет энергосберегающих режимов работы блока доменных воздухонагревателей с использованием имитационной модели основанной на применении искусственных нейронных сетей // Студенческая молодежь – науке будущего. Сб.тез.докл.студенческой научной конференции / Под общ. ред. Л.В. Радионовой. Магнитогорск: МГТУ 2005г.166 с. – С.96.

14. Заявка на получения патента на изобретение №2009139582/06(056110) поданная в РОСПАТЕНТ ФГУ ФИПС «Федеральное государственное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам». Решение о выдаче патента от 01.02.2011г. под наименованием: «Способ автоматической оптимизации процесса горения в топке барабанного парового котла». МПК F23N 1/02(2006.01).

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.298.03

ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

(протокол № 4 от «28» мая 2011 г.)