

Регулирование нагрузки и обеспечение экономичности паровых котлов с экстремальным регулятором

© 2014 г. Сабанин В.Р.¹, Кормилицын В.И.¹, Костык В.И.¹, Смирнов Н.И.¹,
Коротеев А.В.¹, Репин А.И.²

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”¹ – ЗАО “Энергоавтоматика”²
e-mail: SabaninVR@mpei.ru

Анализируются основные проблемы управления малыми и средними паровыми котлами. Отмечаются недостатки существующих нормативно-технических документов в части современных требований к качеству управления котлами, а также недостатки традиционной концепции о процессе сжигания топлива, способов и алгоритмов управления котлами. Обосновывается подход к созданию системы управления, когда котел по каналам регулирования нагрузки и экономичности рассматривается как нелинейный связный объект управления. Для регулирования нагрузки и экономичности работы котла предлагается универсальная структурная схема, предусматривающая возможность реализации в современных контроллерах как известных методов, так и нового способа с использованием экстремального регулятора, обеспечивающего минимум расхода топлива при заданной тепловой нагрузке котла.

Ключевые слова: паровой котел, тепловая нагрузка, оптимальный режим горения, регулятор топлива, регулятор воздуха, экономичность работы котла, экстремальный регулятор, программируемый контроллер, командный блок.

DOI: 10.1134/S0040363614110071

Опубликованные в [1] результаты исследований показали, что главной причиной низкой энергоэффективности находящихся в длительной эксплуатации котлов малой и средней мощности (далее просто котлов) является недостаточная культура их эксплуатации. Кроме того, в настоящее время в России прослеживается устойчивая тенденция сжигания в энергетических котлах различных видов древесных и сельскохозяйственных твердых отходов, масел, попутных газов и т.д. Эти продукты как горючие вещества нередко обладают неизвестными и изменяющимися во времени теплотой сгорания и влажностью, а отходы могут подаваться в топку с разной интенсивностью.

Таких котлов в России тысячи, и число их растет. В основном они покрывают потребность в тепловой энергии жилищно-коммунальные хозяйства небольших поселений и предприятий малого и среднего бизнеса. Их владельцы, не имея средств на замену и выполняя посильные ремонты и модернизацию, часто не получают ожидаемого эффекта по следующим причинам:

в России снизилась квалификация оперативного персонала, особенно в отдаленных от центров поселениях;

ухудшилось качество наладки малых и средних котлов из-за снижения требований со стороны владельцев и недостатка квалифицированного персонала в самих наладочных организациях;

вопросам управления классическим паросиловым оборудованием энергетических источников малой и средней мощности в России уделяется мало внимания – и это наиболее важная причина.

Проблема повышения энергоэффективности таких котлов находится в сфере внимания различных мелких коммерческих фирм, специализирующихся по горелкам, котлам, автоматике и газоаналитическим приборам. Они проводят наладочные работы, составляют режимные карты, ремонтируют и обновляют оборудование. Однако в подавляющем большинстве случаев, они производят только физическую замену оборудования без изменения принципов его функционирования. Такие виды работ легко выполняются и быстро сдаются заказчику. Это выгодно продавцам технических средств. Но в подобных работах не просматриваются теоретические составляющие, направленные на повышение энергоэффективности оборудования.

¹ 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. НИУ МЭИ.

² 109316, Москва, Остаповский пр-д, д. 3, стр. 2. ЗАО “Энергоавтоматика”.

Эта тенденция особенно заметно проявляется в области оснащения котлов новыми техническими средствами автоматизации. Старые измерительные и регулирующие приборы заменяют современными контроллерами, а алгоритмы их работы обычно остаются неизменными. Более того, нередко котлы сдаются в эксплуатацию без должной динамической настройки систем регулирования.

В настоящее время надзорные органы интенсивно внедряют сложные компьютерные средства защиты газовых горелок. Эти средства защищают оборудование в аварийных ситуациях, при пусках и остановах котлов, при этом способы управления экономичностью сжигания топлива в энергетических режимах остаются старые. Однако существующие нормативные документы по наладке котлов не содержат требований к показателям качества работы систем регулирования. Действующие в России методические указания по наладке систем регулирования процесса горения газомазутных котлов [2] существенно устарели. Изложенная в них методика формальна и ориентирована на линейные одноконтурные системы. В ней не отражены особенности статических и динамических свойств процесса горения, не определено понятие оптимальных режимов работы котлов. Очевидно, поэтому наладчики систем регулирования предпочитают настраивать режимы работы котлов с завышенными избытками воздуха, что приводит к работе их в условиях, далеких от оптимальных.

Следует отметить еще одну важную деталь. Работами по настройке систем регулирования котлов все больше занимаются не те организации, которые получают прибыль или терпят убытки от эксплуатации котлов, а те, кто далек от энергетики: производители комплектующих изделий для оснащения котлов, контроллеров и программно-технических комплексов, частотно-управляемых приводов и т.д. В результате в Интернете и печатных изданиях появляется много материалов, в которых не просматриваются важные свойства и характеристики котла и конечные цели регулирования.

Авторы статьи присоединяются к мнению авторов [3], что методики настройки систем регулирования в России устарели, при их разработке не используются в достаточной степени новые возможности современных программно-технических комплексов (ПТК). По мнению авторов, при решении данной проблемы следует избегать обычно применяемой теоретической платформы линейных систем. В отечественной теплоэнергетике широко используются электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) постоянной скорости, управляемые в импульсных режимах. Исследования показывают, что в типовых системах регулирования действие различных нелинейных факторов (зона нечувствительности, люфт и выбег ЭИМ и др.)

при малых значениях рассогласования так искажает работу систем регулирования, что ничего похожего на их работу со старательно настроенными линейными ПИ- или ПИД-регуляторами не наблюдается. Следует обратить внимание на определение устойчивости по Ляпунову, т.е. разделить понятия абсолютной устойчивости “в малом” и устойчивости “в большом”. Можно считать, что все действующие системы устойчивы “в большом”. Кажущаяся абсолютная устойчивость часто достигается не настройкой параметров регулятора, а введением повышенной зоны нечувствительности. Если же отклонение превышает порог нечувствительности и возникают колебания, то эксплуатационный персонал нередко, вместо того чтобы исправить настройки регулятора, просто переходит на ручное управление.

В связи с этим необходимо сконцентрировать усилия на разработке современных методик настройки конкретных систем регулирования технологических процессов с учетом их нелинейных свойств. Особенно это относится к малым и средним паровым котлам, которых в России насчитываются тысячи. В то время, когда в законодательном порядке в стране вводятся запреты на использование осветительных ламп накаливания в целях экономии энергоресурсов, энергетические котлы заслуживают того, чтобы для настройки их работы на оптимальные режимы была разработана специальная методика. При этом очевидно, что экономии энергоресурсов следует начинать с экономии топлива при выработке тепла.

Для обоснования предлагаемого в настоящей статье способа регулирования барабанных паровых котлов используются следующие данные о процессе горения и энергетическом паровом котле как объекте управления:

необходимым условием существования стационарного режима работы котла является баланс между вырабатываемым и отбираемым потребителем теплом $Q_k^{\text{выраб}} = Q_k^{\text{потр}}$;

на работающих котлах (внутри допустимых диапазонов изменения) существует такое значение расхода воздуха, при котором для выработки требуемого количества тепла (расхода пара с заданными параметрами) котел будет потреблять минимальное количество топлива;

если в рабочем диапазоне изменения расхода воздуха V_B есть одно такое значение $V_B^{\text{опт}}$, при котором требуемый для выработки заданной теплопроизводительности котла $Q_k^{\text{зд}}$ расход топлива является минимальным B_T^{min} , то в окрестности $V_B^{\text{опт}}$ существуют два значения расхода воздуха $V_B^1 > V_B^{\text{опт}} > V_B^2$, для которых будут одинаковыми значения $B_T^{1,2} > B_T^{\text{min}}$; это свойство отражает нелинейность процесса горения, его необходимо

учитывать для обеспечения устойчивости и эффективности системы управления котлом;

при работе котла имеет место статическая и динамическая связь систем регулирования нагрузки (с воздействием на расход топлива) и экономичности (с воздействием на расход воздуха), которая проявляется через изменение задаваемой теплопроизводительности котла $Q_k^{зд}$.

В регулирующих режимах работы котлов баланс по теплу между выработанным котлом и отобранном потребителем поддерживается регулятором, воздействующим на расход топлива, который принято называть регулятором нагрузки [4]. В базовых режимах на малых и средних котлах заданная тепловая нагрузка поддерживается обычно по одноконтурной схеме с воздействием регулятора на расход топлива. На больших газомазутных котлах заданная тепловая нагрузка поддерживается по типовой каскадной схеме со стабилизирующим регулятором расхода топлива V_T и корректирующим регулятором по выбранному показателю тепловой нагрузки $Q_k^{зд}$ (обычно с использованием сигналов по расходу и давлению пара за котлом [5]).

Задача обеспечения экономичности работы котла возлагается, как правило, на систему регулирования расхода воздуха V_B , в которой первичное регулирование осуществляется по схеме “топливо–воздух”. При этом задание по расходу воздуха $V_B^{зд}$ вычисляется пропорционально расходу топлива V_T с заданным коэффициентом: $V_B^{зд} = V_T K$. Далее коэффициент K может корректироваться (вторичное регулирование) с помощью корректирующего регулятора по содержанию кислорода O_2 в продуктах горения: $K = f(O_2)$. На малых и средних котлах кислородомер часто не устанавливается и подача воздуха осуществляется по схеме первичного регулирования “топливо–воздух”.

По существующей методике [6] оптимальное соотношение “топливо–воздух” определяется в процессе наладки котла и фиксируется в режимной карте. В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент режимной карты котла ДКВР-6.5/13, опубликованной в [7]. На этом рисунке сплошной линией с точками показан график зависимости расхода топлива от расхода воздуха для нескольких режимов работы котла при оптимальных коэффициентах избытков воздуха α^{opt} .

Оптимальные соотношения давлений в режимных картах определяются по субъективным экспертным оценкам отсутствия недожога топлива по результатам измерений содержания оксида углерода, полученным с помощью газоанализатора, установленного на время испытания в контрольной точке котла (в поворотной камере). Экспертное решение о наличии недожога принимается на основании небольшого числа измере-

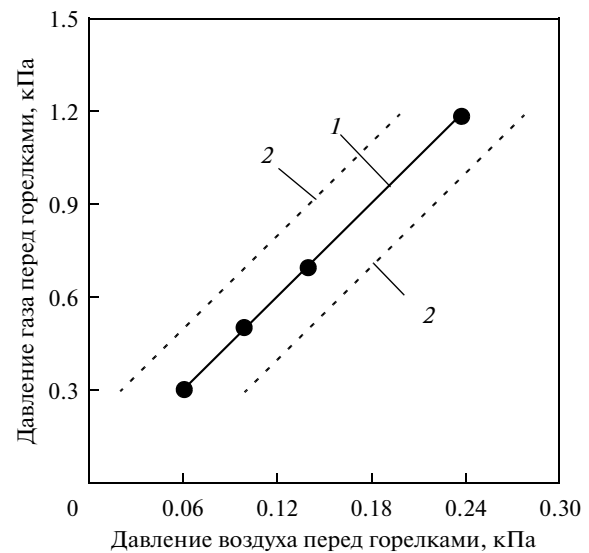


Рис. 1. График из таблицы режимной карты котла ДКВР-6.5/13.

1 – из режимной карты; 2 – коридоры отклонений от точек режимной карты, допустимых при оптимизации

ний при получении оценок содержания CO с разбросом от 20 до 100 ppm.

Недостатком существующей методики является то, что проверить правильность установки зонда и остальных элементов газоанализатора практически невозможно, а для обеспечения статистической представительности измерений требуется выборка со значительно **большим** количеством измерений. Кроме того, в методических документах не упоминается, но следует отметить, что при испытаниях котлов измеряются малые остаточные концентрации CO, H₂ и O₂. В идеальном случае, при исправных горелочных устройствах, процесс горения должен завершиться в топочной камере [8]. Дожигание топлива после поворотной камеры недопустимо и опасно. Наличие в поворотной камере CO, H₂ свидетельствует о недожоге топлива, а O₂ – о том, что в топку подают количество воздуха большее, чем требуется для сжигания топлива, или в котле существуют присосы воздуха.

Из метрологии известно, что результаты любых измерений содержат полезные сигналы и ошибки, обусловленные погрешностями средств измерения. При приближении процесса горения к идеальному состоянию доля полезных сигналов в оценках результатов измерения остаточных концентраций веществ CO, H₂ и O₂ уменьшается, а доля погрешностей газоанализаторов – увеличивается. Из-за этого воспроизводимость результатов газового анализа на содержание CO и H₂ настолько мала, что проверить достоверность режимных карт и качество наладочных работ по определению оптимального режима, при котором отсутствует недожог, практически невозможно. Поэтому ис-

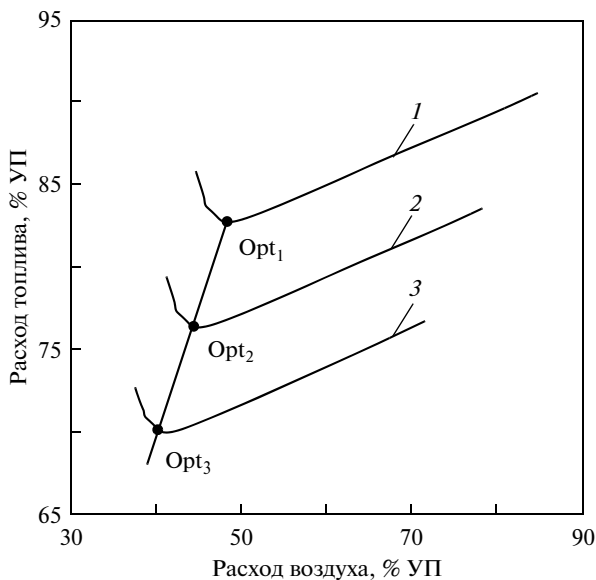


Рис. 2. Номограмма зависимостей расходов топлива от расходов воздуха для трех значений расхода пара, вырабатываемого котлом ДКВР-6.5/13. % УП – процент открытия регулирующего органа.

Расход пара, т/ч: 1 – 6.5; 2 – 6.0; 3 – 5.5

пользуемый в настоящее время для коррекции расхода воздуха сигнал по содержанию кислорода является скорее показателем технического состояния топочно-горелочного устройства, чем оптимальности режима горения.

Еще один недостаток существующих режимных карт – заложенное в них искусственное завышение коэффициента избытка воздуха α , допускаемое действующими методическими указаниями [9]. Официальной причиной этого запаса было исключение недожога топлива. Очевидно, из-за перечисленных причин к настоящему времени на малых и средних котлах рекомендуемое увеличение коэффициента избытка воздуха α на 0.02–0.05 плавно перешло в 0.2–0.5 в режимных картах, а в эксплуатации дошло до 1.

Для устранения недостатков традиционных режимных карт в [10] предлагается пользоваться номограммами (рис. 2), в которых приведены графики зависимостей расходов топлива от расхода воздуха для нескольких значений расходов вырабатываемого котлом пара. Номограммы на

рис. 2 и графики традиционных режимных карт (см. рис. 1) различаются видом представления данных, но в них есть общая информация. Если графики номограммы на рис. 2 и графики режимных карт на рис. 1 построить в одинаковых координатах, то линия, соединяющая на рис. 2 оптимальные точки Opt_i , будет соответствовать линии с точками на рис. 1. В дополнение к этому, на рис. 2 видна экстремальная зависимость расхода топлива от расхода воздуха при постоянной тепловой нагрузке котла.

Инновационным предложением настоящей статьи является использование экстремального алгоритма управления в связанной системе регулирования нагрузки и экономичности работы котла. Экстремальный алгоритм предназначен для оперативного поиска и поддержания таких расходов воздуха V_B^{opt} (см. рис. 2), при которых котел, обеспечивая заданную теплопроизводительность $Q_k^{зд}$, потребляет минимальное количество топлива B_T^{min} . Систему регулирования с экстремальным алгоритмом рекомендуется использовать на котлах, режимные карты которых имеют большую степень неопределенности. Такие проблемы возникают, если в котлах сжигается топливо с неизвестной и изменяющейся во времени калорийностью и котлы обладают переменными во времени эксплуатационными характеристиками.

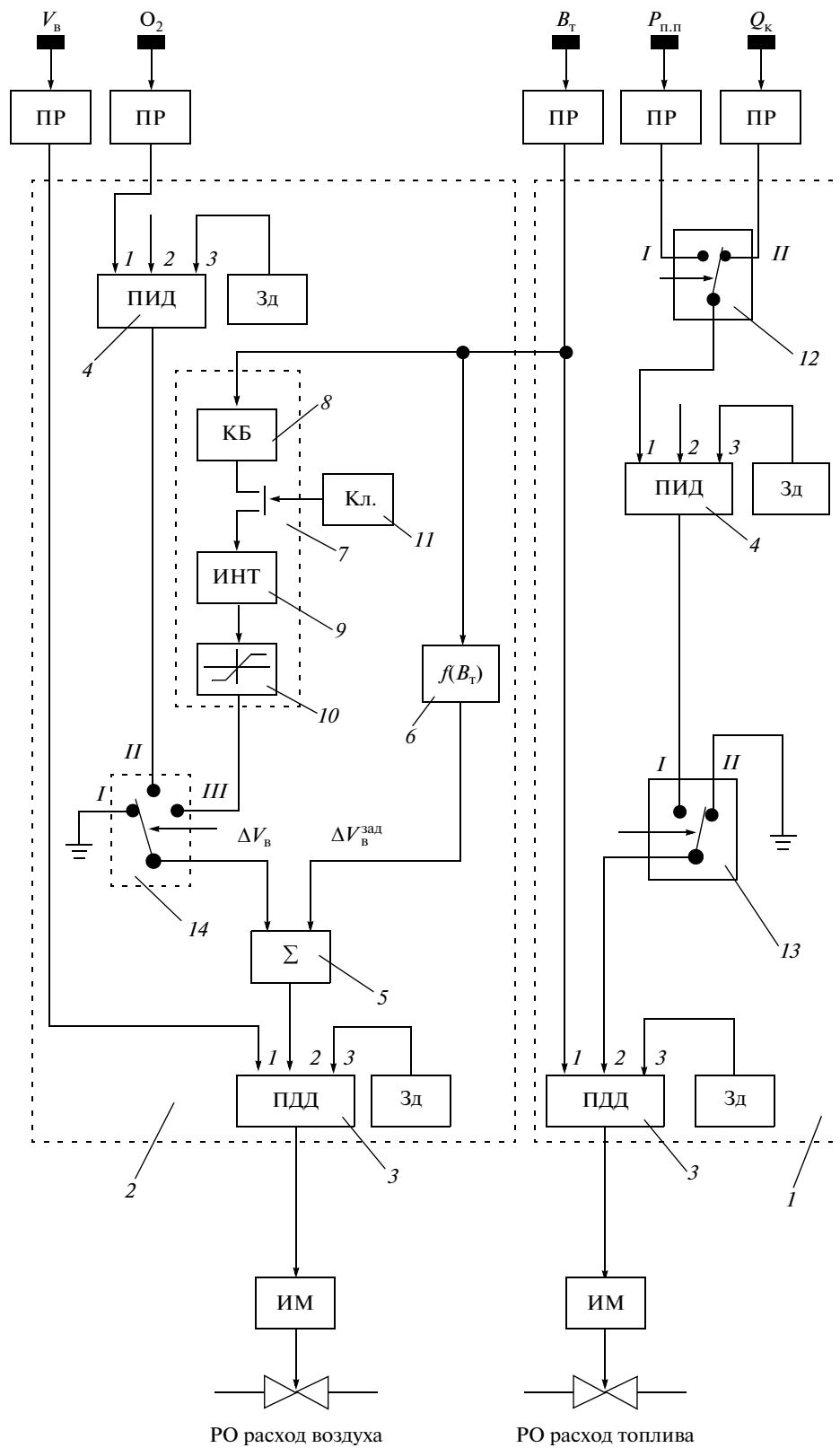
Для технической реализации экстремального алгоритма предлагается использовать командный блок (КБ) шагового экстремального регулятора [11]. Командный блок разработан для применения в ПТК с общепромышленными программируемыми контроллерами. Программа работы КБ может быть закодирована в контроллере в виде самостоятельного экстремального регулятора при работе с исполнительным механизмом типа МЭО или др., а также в виде специального функционального блока в программном обеспечении контроллера, реализующего многоконтурную систему регулирования.

В настоящей статье предлагается структурная схема универсальной многовариантной связанной системы регулирования нагрузки и экономичности работы парового котла (рис. 3). В схеме предусмотрена возможность реализации всех рассмотренных ранее методов управления паро-

Рис. 3. Виртуальная структурная схема контроллера, реализующего систему регулирования нагрузки и экономичности работы котла.

1 – каскадная схема регулирования нагрузки котла; 2 – комбинированная схема регулирования экономичности работы котла; 3 – модули ПИД-алгоритмов с импульсными выходами; 4 – модули ПИД-алгоритмов с аналоговым выходом; 5 – модуль сумматора; 6 – модуль кусочно-линейного преобразования сигнала; 7 – блок модулей, экстремального алгоритма регулирования; 8 – модуль КБ; 9 – модуль интегратора; 10 – модуль ограничения; 11 – модуль выключателя экстремального регулятора; 12–14 – переключатели режимов работы схем регулирования котла; РО – регулирующий орган; ИМ – исполнительный механизм; ИНТ – модуль интегратора; Кл. – ключ включения экстремального регулятора; ПДД – модуль промышленного контроллера, реализующего ПИД закон регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости; Зд – задатчик





вым котлом, в том числе с использованием экстремального алгоритма связи сигнала по расходу топлива с задатчиком регулятора расхода воздуха, целью которого является минимизация расхода топлива при заданной теплопроизводительности котла.

Схема системы предназначена для реализации трех режимов регулирования расхода топлива (нагрузки котла) и трех режимов регулирования расходов воздуха (экономичности работы котла):

Регулирование нагрузки в регулирующем режиме работы котла. В этой схеме корректирующим регулятором каскадной схемы 1 является регулятор давления перегретого пара $p_{п.п.}$. Переключатели 12 и 13 устанавливаются в позиции I.

Регулирование нагрузки в базовом режиме работы котла. Корректирующим регулятором каскадной схемы 1 является регулятор расхода тепла Q_k , например, в виде косвенного показателя с использованием сигналов по расходу и давлению перегретого пара [9]. Переключатель 12 устанавливается в позицию II, а переключатель 13 – в позицию I.

Прямое регулирование расхода топлива применяется в малых котлах. Переключатель 13 устанавливается в позицию II.

Регулирование экономичности работы котла с одним каналом коррекции расхода воздуха по расходу топлива (схема “топливо–воздух”). В канале коррекции содержится модуль 6 для вычисления задания регулятору расхода воздуха $V_B^{зд}$ по сигналу V_T с помощью кусочно-линейного преобразования. Модуль настраивается по точкам режимной карты (см. рис. 1) или по точкам Ort_i номограммы (см. рис. 2). Переключатель 14 устанавливается в позицию I.

Регулирование экономичности работы котла по схеме “топливо–воздух” с корректирующим контуром по содержанию кислорода O_2 . Основная составляющая задания регулятору расхода воздуха $V_B^{зд}$ формируется в зависимости от расхода топлива в модуле 6, а корректирующая составляющая по содержанию кислорода $\Delta V_B^{зд}$ – в функциональном модуле аналогового ПИД-регулятора 4. Эти сигналы поступают в сумматор 5, и их сумма $V_B^{зд} + \Delta V_B^{зд}$ подается на второй вход модуля ПИД-алгоритма с импульсным выходом 3. Переключатель 14 устанавливается в позицию II.

Регулирование экономичности работы котла с экстремальным регулятором. На вход регулятора расхода воздуха поступает сигнал расхода топлива по двум каналам. В одном канале расход топлива V_T обычным способом в модуле 6 преобразуется в основную (постоянную) составляющую для задания регулятору расхода воздуха $V_B^{зд}$. Второй канал в модуле 7 реализует переменную составляющую

для задания $\Delta V_B^{зд}$, формируемую экстремальным алгоритмом в процессе поиска минимального расхода топлива V_T . Модуль 7 состоит из модуля 8 (КБ), модуля интегратора 9, модуля ограничения 10 и выключателя 11.

Модуль КБ является основным элементом экстремального регулятора. Подробное описание его работы приведено в [8]. В зависимости от приращения и скорости его изменения для расхода топлива модуль КБ генерирует последовательность импульсов. Импульсы интегрируются в модуле 9 и формируют переменную составляющую $\Delta V_B^{зд}$, которая в 9 суммируется с $V_B^{зд}$ и вносит изменения в сигнал задания по расходу воздуха. При достижении минимума приращений по расходу топлива (при заданной тепловой нагрузке котла) формирование импульсов автоматически прекращается.

Для предотвращения выхода корректирующих приращений $\Delta V_B^{зд}$ за допустимые пределы экстремальный регулятор 7 содержит модуль ограничения 10, который настраивается в соответствии с режимной картой. На рис. 1 пунктирными линиями показаны коридоры отклонений от точек режимной карты, допустимых при оптимизации.

Таким образом, для повышения энергоэффективности паровых котлов предлагается изменить сложившееся представление о процессе горения и работе парового котла и перейти к разработке методики построения и настройки целевых алгоритмов регулирования нагрузки и экономичности работы котлов с учетом их нелинейных свойств.

Выводы

1. Существующие нормативно-технические документы по управлению малыми и средними паровыми котлами нуждаются в корректировке с учетом современных требований к качеству управления котлами, а традиционная концепция о процессе сжигания топлива и алгоритмах управления этими котлами имеет существенные недостатки.

2. При работе котла в оптимальных режимах расход топлива связан с расходом воздуха экстремальной зависимостью, в связи с чем котел по каналам регулирования нагрузки и экономичности следует рассматривать как нелинейный связанный объект управления.

3. Предложенная универсальная структурная схема связной системы может быть использована для регулирования нагрузки и экономичности работы котла. Она позволяет реализовать в современном программируемом контроллере как известные варианты системы, так и новый вариант с использованием экстремального регулятора, обеспечивающего минимум расхода топлива при заданной тепловой нагрузке котла.

Список литературы

1. **Воликов А.Н., Маслов Ю.В., Новиков О.Н.** Энергоэкологическая реабилитация – экономичный путь повышения энергоэффективности предприятия // Инженерные системы. 2011. № 2. С. 42–49.
2. **РД 153-34.1-35418-2002.** Методические указания по наладке системы регулирования процесса горения газомазутных котлов. М.: Фирма ОРГРЭС, 2003.
3. **Проблемы** создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.И. Штейнберг, Л.П. Сережин, И.Е. Залуцкий, И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 7. С. 1–7.
4. **СО 34.35.101-2003.** Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации и автоматического регулирования на тепловых электростанциях. М.: Инженерный центр ЕЭС – Гидропроект; Ленгидропроект; Теплоэлектропроект; Фирма ОРГРЭС, 2004.
5. **Плетнев Г.П.** Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. **РД 34.25.514-96.** Методические указания по составлению режимных карт котельных установок и оптимизации управления ими. М.: Фирма ОРГРЭС, 1996.
7. **Денисов-Винский Н.Д., Афанасьев В.А.** Некоторые вопросы энергетического обследования котельных // Новости теплоснабжения. 2011. № 11. С. 34–35.
8. **Кормилицын В.И.** Экологические аспекты сжигания топлива в паровых котлах. М.: Издательство МЭИ, 1998.
9. **Трембовля А.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок: 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. **Совершенствование** режимно-наладочных работ на котлах малой и средней мощности / В.Р. Сабанин, В.И. Кормилицын, В.И. Костык, М.А. Волков // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 6 (86). С. 24–28.
11. **Патент РФ № 24757972.** Командный блок экстремального регулятора / В.Р. Сабанин, В.С. Коптев, В.И. Кормилицын. Приоритет от 20.09.2011, опублик. 20.02.2013.