

УДК 681.5.015.23:658.264

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107358

Розглянуто можливість використання штучних газів в якості палива замість природного газу для енергетичних барабанних котлів. Запропоновано технічні рішення для автоматичного управління як одним барабанним котлом, так і групою, що працює на загальний паропровід. Рішення засновані як на використанні додаткових технічних засобів, так і багатовимірних оптимальних алгоритмів керування

Ключові слова: барабанний котел, автоматична система управління, штучні горючі газу, технологічна ділянка

Рассмотрена возможность использования искусственных газов в качестве топлива вместо природного газа для энергетических барабанных котлов. Предложены технические решения для автоматического управления как одним барабанным котлом, так и группой, работающей на общий паропровод. Решения основаны как на использовании дополнительных технических средств, так и многомерных оптимальных алгоритмах управления

Ключевые слова: барабанный котел, автоматическая система управления, искусственные горючие газы, технологический участок

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАРАБАНЫХ КОТЛОВ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГОРЮЧИХ ИСКУССТВЕННЫХ ГАЗОВ

М. В. Максимов

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

E-mail: prof.maksimov@gmail.com

В. Ф. Ложечников

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: fontan@optima.com.ua

О. Б. Максимова

Кандидат технических наук

Кафедра компьютерных систем и управления бизнес-процессами

Одесская национальная академия пищевых технологий

ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

E-mail: m.oxana.b@gmail.com

А. В. Лысюк

Аспирант*

E-mail: lysyuk92@gmail.com

*Кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов

Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Согласно экспертному прогнозу роста мировой экономики, спрос на энергетические ресурсы может вырасти на 36 % с 2011 по 2030 год [1]. Ключевыми факторами роста энергопотребления будут рост численности населения планеты (до 8,3 млрд. к 2030 году) и рост глобального ВВП (в два раза по сравнению с 2011 годом). Благодаря быстрой индустриализации и урбанизации стран с низким и средним уровнем дохода на них придется 70 % от мирового роста ВВП и более 90 % роста мирового спроса на энергию. Логичное, пропорционально росту ВВП, увеличение спроса на энергию будет ограничено непрерывным улучшением энергоэффективности ее использования. Снижение энергоемкости производства будет обеспечено использованием возобновляемых энергоресурсов, сланцевых энергоносителей и новых более совершенных технологий производства промышленных товаров и переработки сырья [2].

В условиях, когда стоимость традиционных энергетических ресурсов на мировых рынках испыты-

вает резкие колебания и доступ к ним может быть ограничен, прежде всего, нужно учитывать его географическое положение и наличие определенного вида энергоресурсов. Перспективным направлением развития энергетической отрасли может стать реализация мало затратных и быстро окупаемых мероприятий. Это позволит без привлечения значительных средств, в кратчайшие сроки уменьшить потребление топлива и электроэнергии. Например: использование для уже работающих на органическом топливе парогенераторов новых структурных схем и систем автоматического управления. Благодаря этому есть возможность без существенной модернизации оборудования использовать в качестве топлива горючие искусственные газы.

К искусственным газам, которые получают из твердого топлива, относятся коксовый, сланцевый, генераторный и доменный. В большинстве случаев эти газы являются побочным продуктом химического или металлургического производства и невыгодны экономически для передачи на дальние расстояния, так как имеют малую теплотворную способность (табл. 1).

Таблица 1

Плотность и теплотворная способность искусственных газов

Газ	Плотность, кг/м ³	Теплотворная способность, МДж/м ³
Коксовый	0,342	17,58
Сланцевый	1,040	13,85
Генераторный смешанный	1,141	5,15
Генераторный, полученный при паро-кислородном дутье под давлением	0,576	15,70
Доменный	1,283	4,10
Газ, полученный путем низкотемпературного коксования из битуминозных углей	0,620	31,90

Поэтому исследование возможности усовершенствования существующих систем управления для сжигания дешевого искусственного газа является актуальным направлением развития тепловой автоматики.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В решении проблемы сжигания топлива с переменным химическим составом можно выделить несколько основных направлений: конструкционный, технологический и аналитический. Ведущими мировыми разработчиками технологий сжигания синтез-газов являются Siemens (Германия), General Electric (США) и Mitsubishi Heavy Industries (Япония), которые предлагают сжигать искусственные газы в газотурбинных установках (ГТУ) с усовершенствованными камерами сгорания [3]. Также рассматривается возможность модернизации самих горелочных устройств с целью изменения геометрии факела, где в конструкции горелки используется эффект взаимодействия газовых струй с набегающим поперечным потоком воздуха [4].

Другой подход связан с модификацией самого топлива – разбавлением синтез-газа азотом, паром или продуктами сгорания [5]. Все это значительно повышает мощность ГТУ. То есть, увеличение расхода продуктов сгорания через газовую турбину и повышение мощности паротурбинной части происходит благодаря повышению массовых расходов дымовых газов через котёл-утилизатор. Также возможно добавление в низкосортное топливо активаторов горения (анакларид) с одновременным улучшением системы подачи топлива в топку [6]. В странах с развитым аграрным сектором используется совместное сжигание ископаемых топлив и биомассы [7].

Экономический эффект также может быть достигнут за счет разработки индивидуальной технологической схемы, подготовки и подачи искусственного газа к месту сжигания. Туда же нужно отнести схемы промежуточного отбора теплоты для производства электроэнергии. Схемы не из конечного агрегата сжигания искусственного газа, а из промежуточной точки его частичного охлаждения [8]. В случае наличия нескольких потребителей газообразного топлива можно распределить тепловую нагрузку между группой котлов, работающих на общий паропровод, в зависимости от калорийности сжигаемого газа. В основе такого

решения лежит минимизация целевой функции, которая учитывает вероятность отказа оборудования и максимальную эффективность его использования [9].

Аналитический подход связан с определением химического состава горючего газа с помощью математической модели процесса сжигания топлива с известным качественным составом [10]. Дальнейшее усовершенствование математического метода определения состава горючего газа позволяют смягчить ограничения по используемому топливу и реализовать эту идею в виде технического устройства [11]. Такой подход позволит усовершенствовать существующие системы нелинейного управления котлоагрегатом, в которых экстремальный регулятор анализирует текущие расходы топлива, воздуха и пара, и определяет оптимальное соотношение компонентов газо-воздушной смеси [12].

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является определение технической возможности по расширению (в сторону увеличения) диапазона управляющего воздействия автоматической системы управления тепловой нагрузкой с сигналом по теплоте. Такая система управления должна обеспечить подачу на горелочные устройства необходимого количества искусственного газа, когда пропускная способность регулирующего органа ограничена.

Для достижения намеченной цели были выделены следующие задачи:

- определить влияние пропускной способности регулирующего органа на расход искусственного газа на горелочные устройства;
- определить зависимость для расчета устройства связи между АСУ тепловой нагрузкой и системой управления газовым компрессором;
- синтезировать многомерную оптимальную систему управления группой барабанных котлов, которые сжигают искусственный газ и генерируют пар на общий паропровод.

4. Материалы и методы исследования системы управления технологическим участком генерации пара

4.1. Определение влияния состава искусственного газа на пропускную способность регулирующего органа

Паровые барабанные котлы широко используются на тепловых электростанциях, промышленных и теплофикационных котельных. Для поддержания заданной производительности пара используется типовая автоматическая система управления (АСУ) тепловой нагрузки (рис. 1). Задача АСУ тепловой нагрузки состоит в поддержании заданного давления перегретого пара, когда барабанный котел работает в регулирующем режиме или заданного расхода перегретого пара, когда котел работает в базовом режиме. АСУ тепловой нагрузки имеет две модификации. Первая – с сигналом по расходу топлива, когда на горелочные устройства подается жидкое или газообразное топливо с постоянной теплотворной способностью. Вторая – с сигналом по теплотворной способности топлива, когда используется твердое топливо, или качественный состав жидкого или газообразного топлива не является постоянным [13].

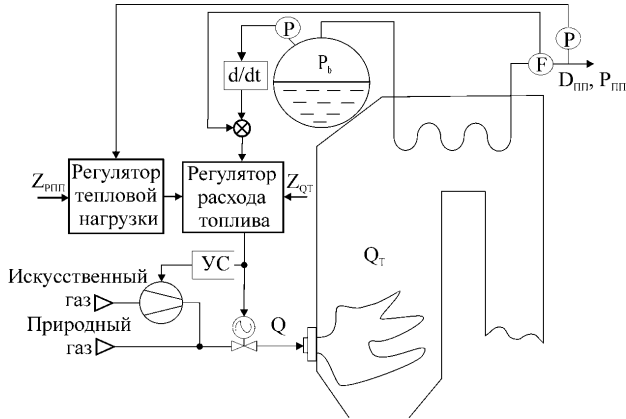


Рис. 1. Принципиальная схема управления тепловой нагрузкой с сигналом по теплоте

Способность АСУ тепловой нагрузки с сигналом по тепловыделению компенсировать внутритопочные возмущения удельной теплотой сгорания топлива ограничена пропускной способностью регулирующего органа, которая не превышает 20 % от номинального расхода природного газа. Также необходимо учитывать плотность и теплотворную способность искусственных газов, которые могут отличаться от аналогичных свойств природного газа ($\rho_{\text{пг}}=0,68\div 0,85\text{кг/м}^3$, $Q_{\text{н}}^{\text{пг}}=28\div 46\text{ МДж/м}^3$) как в большую, так и меньшую сторону (табл. 1).

Максимальный объемный расход газа, приведенный к нормальным условиям ($P=1,033\text{ кгс/см}^2$, $\Theta=0\text{ }^\circ\text{C}$), через регулирующий орган (РО) определяется уравнением

$$Q_{\text{max}} = 535 K_{\text{ф}}^{\text{max}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{РО}} P_2}{\rho T_1 k'}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{фmax}}$ – максимальная пропускная способность РО, $\Delta P_{\text{РО}}$ – перепад давления на РО, P_2 – давление среды после РО, ρ – плотность газа, T_1 – температура газа перед РО, k' – коэффициент сжимаемости.

Поскольку $K_{\text{ф}}^{\text{max}}$, P_2 , T_1 , k' в процессе работы котельного оборудования практически не меняются, то уравнение (1) можно записать в виде

$$Q_{\text{max}} = K_{\text{РО}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{РО}}}{\rho}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{РО}}$ – постоянный коэффициент, определяющий максимальный расход газа на горелочные устройства в зависимости от перепада давления на РО и плотности газа.

С учетом теплотворной способности газа $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ тепловыделение в топочной камере будет определяться уравнением

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} Q_{\text{max}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} K_{\text{РО}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{РО}}}{\rho}}. \quad (3)$$

Если принять, что давление газа в газопроводе поддерживается постоянным, то тепловыделение в топочной камере при полностью открытом РО будет зависеть только от плотности газа и его теплотворной способности. Отношение тепловыделения природного газа $Q_{\text{T}}^{\text{пг}}$ к тепловыделению искусственного газа $Q_{\text{T}}^{\text{иг}}$ позволяет определить потенциальную возможность использования существующего котельного оборудо-

вания для сжигания альтернативного газообразного топлива

$$\frac{Q_{\text{T}}^{\text{пг}}}{Q_{\text{T}}^{\text{иг}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{пг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{иг}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{иг}}}{\rho_{\text{пг}}}}. \quad (4)$$

В табл. 2 представлены результаты расчета отношения (4) для средней плотности ($\rho_{\text{пг}}=0,765\text{ кг/м}^3$) и среднего тепловыделения природного газа ($Q_{\text{н}}^{\text{пг}}=37\text{ МДж/м}^3$).

Таблица 2

Отношение тепловыделения природного газа к тепловыделению искусственного газа на основе результатов расчета по формуле (4)

Газ	$\frac{Q_{\text{T}}^{\text{пг}}}{Q_{\text{T}}^{\text{иг}}}$	Превышение пропускной способности, %
Коксовый	1,41	21
Сланцевый	3,11	191
Генераторный смешанный	8,77	757
Генераторный, полученный при паро-кислородном дутье под давлением	2,04	84
Доменный	11,7	1050
Газ, полученный путем низкотемпературного коксования из битуминозных углей	1,04	–

Результаты расчета показывают, что газ, который получен путем низкотемпературного коксования из битуминозных углей, можно использовать вместо природного газа. В этом случае дополнительное открытие регулирующего органа для обеспечения номинальной генерации пара составит 4 %. Одним из способов увеличения пропускной способности регулирующего органа является увеличение перепада давления на нем. Этого можно достичь, если искусственный газ подавать на горелочные устройства с помощью компрессора. Компрессор, за счет повышения давления газа перед полностью открытым регулирующим органом, увеличивает его расход и компенсирует его низкую теплотворную способность и большую плотность.

4. 2. Математическое описание объекта управления

Рассматриваемый технологический участок состоит из компрессора и газопровода искусственного газа, барабанного котла и паропровода. Природный или искусственный газ проходит через регулирующий орган и сгорает в топочной камере. Регулируемыми параметрами для этого участка являются: давление перегретого пара $P_{\text{пп}}$ и тепловыделение в топочной камере Q_{T} . Управляющим воздействием – положение РО по расходу газообразного топлива $h_{\text{РО}}$ или число оборотов привода компрессора n . Возмущающими воздействиями – теплотворная способность топлива (внутреннее возмущение) и тепловая нагрузка потребителя пара (внешнее возмущение). Для управления технологическим участком используется двухконтурная схема регулирования с стабилизирующим регулятором расхода топлива и корректирующим регулятором давления перегретого пара (рис. 1).

Основываясь на работах, рассматривающих вероятностный подход распределения тепловой нагрузки

[9], и исследовании по управлению когенерационной установкой [14], можно записать систему линейных дифференциальных уравнений в отклонениях для регулируемого участка. Система уравнений также учитывает особенностей выбранной схемы регулирования. Уравнение для газового компрессора и участка газопровода от него до топочной камеры:

$$T_{\text{гп}} \Delta \dot{Q}_{\text{иг}} + \Delta Q_{\text{иг}} = T_k \Delta \dot{n} + k_k \Delta n, \tag{5}$$

где $T_{\text{гп}}$ – инерционность газопровода, k_k – коэффициент передачи между числом оборотов n и объемным расходом искусственного газа $Q_{\text{иг}}$.

Уравнение тепловыделения в топочной камере для природного и искусственного газа:

$$\Delta Q_F = Q_T^{\text{пт}} K_{\text{рo}} \Delta h_{\text{рo}} + Q_T^{\text{иг}} \Delta Q_{\text{иг}} + Q_{\text{иг}} \Delta Q_T^{\text{иг}}. \tag{6}$$

Уравнение передачи тепла в топочной камере к пароводяной смеси в экранных поверхностях нагрева:

$$T_T \Delta \dot{Q}_T + \Delta Q_T = k_f \Delta Q_F, \tag{7}$$

где T_T – инерционность процесса теплопередачи, k_f – коэффициент передачи тепла от факела к экранным поверхностям нагрева.

Уравнение зависимости давления пара в барабане котла P_b от количества тепла, полученного пароводяной смесью, и расходом пара к потребителю $D_{\text{пп}}$:

$$T_B \Delta \dot{P}_b = k_T \Delta Q_T + k_D \Delta D_{\text{пп}}, \tag{8}$$

где T_B – инерционность процесса генерации пара в барабане котла, k_T, k_D – коэффициенты передачи между тепловосприятием и тепловой нагрузкой соответственно.

Уравнения для паропровода от барабана котла к потребителю:

$$T_{\text{пп}} \Delta \dot{P}_{\text{пп}} + \Delta P_{\text{пп}} = k_{\text{пп}} \Delta P_b, \tag{9}$$

$$T_{\text{пп}} \Delta \dot{D}_{\text{пп}} + \Delta D_{\text{пп}} = k_{\text{пд}} \Delta P_b, \tag{10}$$

где $T_{\text{пп}}$ – инерционность паропровода, $k_{\text{пп}}, k_{\text{пд}}$ – коэффициенты передачи между изменением давления в барабане котла и изменением давления и расхода перегретого пара соответственно.

На основании уравнений (5)–(10), может быть составлена параметрическая схема объекта управления (рис. 2). На схеме видно, что основным неконтролируемым возмущением является изменение теплотворной способности искусственного газа $\Delta Q_T^{\text{иг}}$ и его плотность $\Delta \rho_{\text{иг}}$.

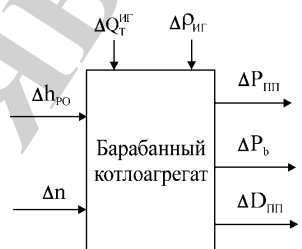


Рис. 2. Параметрическая схема объекта управления

Возмущение изменением calorificity топлива устраняется в типовой АСУ регулятором топлива, использующим в обратной отрицательной связи сигнал по теплоте

$$\Delta Q_T^{\text{изм}} = C_{\text{п}} \frac{dP_b}{dt} + \Delta D_{\text{пп}},$$

где $C_{\text{п}}$ – постоянный коэффициент, характеризующий массовую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла [11].

4. 3. Определение структуры устройства связи и принципиальной схемы управления

Усовершенствованная АСУ тепловой нагрузки барабанного котла должна обеспечить плавный переход на подачу искусственного газа с помощью компрессора, когда регулятор топлива максимально открывает регулирующий орган. В этом случае управляющий сигнал от регулятора топлива, в соответствии с которым до этого происходило перемещение регулирующего органа, должен быть изменен. Изменение управляющего сигнала с помощью УС не должны привести к существенному изменению свойств объекта по регулируемому каналу.

Отношение двух передаточных функций, описывающих изменение тепловыделения в топочной камере в зависимости от положения РО и производительности компрессора, определяет вид устройства связи. Полученное таким образом решение верно, когда АСУ управляет только одним барабанным котлом (рис. 1).

$$W_{\text{ус}}(S) = \frac{Q_T^{\text{пт}} K_{\text{рo}} (T_{\text{гп}} S + 1)}{Q_T^{\text{иг}} K_{\text{к}} \left(\frac{T_{\text{к}}}{K_{\text{к}}} S + 1 \right)}. \tag{11}$$

С учетом малой инерционности газовых компрессоров и участка газопровода от компрессора до горелочного устройства передаточная функция УС (11) может быть упрощена:

$$W_{\text{ус}}(S) \approx \frac{Q_T^{\text{пт}} K_{\text{рo}}}{Q_T^{\text{иг}} K_{\text{к}}}. \tag{12}$$

Упрощенная передаточная функция УС является пропорциональным звеном. Однако наличие в выражении (12) теплотворных способностей природного и искусственного газов накладывают следующие ограничения на работу такой АСУ. На горелочные устройства должен подаваться только один вид искусственного газа, или АСУ должна быть дополнена устройством, определяющим химический состав сжигаемого топлива [11].

В случае, когда в технологический участок входят два и более барабанных котла, часть из них переводят в базовый режим работы (котлы генерируют постоянное количество перегретого пара). Другая часть работает в регулирующем режиме, поддерживая постоянное давление перегретого пара в общем паропроводе [13]. Применение в этом случае для каждого котла отдельного газового компрессора экономически не целесообразно. Решением может быть использование одного производительного компрессора, который должен повышать давление искусственного газа в общем газопроводе

(рис. 3). Механизм управления компрессором (МУК) отслеживает положение РО котла, работающего в регулирующем режиме. В случае полного открытия РО, МУК через соответствующее УС изменяет задание регулятору давления газа в газопроводе для плавного увеличения производительности компрессора. На основании (2), можно определить функциональную зависимость изменения задания регулятору давления газа:

$$\Delta P_{PO} = \rho \left(\frac{Q}{K_{PO}} \right)^2, \quad (12)$$

где Q – требуемый расход газа на горелочные устройства. Поскольку регулятор разрежения поддерживает постоянным давление дымовых газов в топочной камере, то ΔP_{PO} при полностью открытом РО будет зависеть только от давления газа в газопроводе. Следовательно, искомая зависимость для сигнала задания регулятору давления будет:

$$Z_p(t) = kQ^2(t). \quad (12)$$

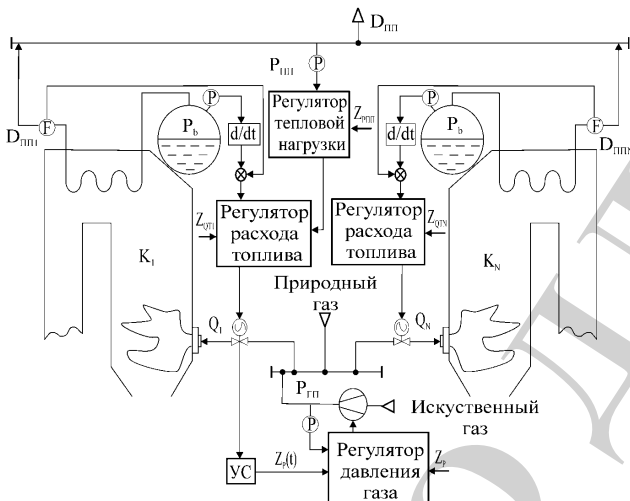


Рис. 3. Принципиальная схема АСУ группы котлов

Увеличение давления в общем газопроводе позволит синхронно восстановить производительность котлов, которые работают в базовом режиме.

4. 4. Результаты исследования синтеза многомерной системы управления группой барабанных котлов работающих на искусственном газе

Современный подход к концепции автоматического управления связан с рассмотрением объекта управления в виде сложной динамической системы с определенным числом входов и выходов. Расчет управляющего воздействия происходит с учетом прямых и перекрестных связей между управляющими воздействиями и регулируемыми параметрами. Для решения задачи многомерного оптимального управления в соответствии с заданным критерием качества необходима математическая модель, которая описывает поведение группы из N барабанных котлов, подключенных к общему паропроводу. Линейные дифференциальные уравнения (6)–(10) формируют подсистемы математических моделей с наборами матриц $\{A_i, B_i, C_i, D_i\}$. Численными

значениями коэффициентов передачи и постоянных времени каждой подсистемы, учитывают индивидуальные теплотехнические и конструктивные характеристики каждого барабанного котла. Для получения обобщенной математической модели необходимо учесть взаимное влияние изменения положения отдельного регулирующего органа на расход газа к другим котлам

$$\Delta Q_{иг} = K_{св} \Delta h_{PO_{N(i)}}, \quad (13)$$

где $K_{св}$ – коэффициент взаимного влияния регулирующих клапанов на расход газа к каждому котлу, и генерацию пара отдельным котлом на общее давление в паропроводе

$$T_{пп} \Delta \dot{P}_{пп} + \Delta P_{пп} = K_{пд} \sum_{i=1}^N \Delta D_i, \quad (14)$$

где $K_{пд}$ – коэффициент, связывающий изменение давления перегретого пара в общем паропроводе с изменением генерации пара отдельного котла ΔD_i .

Таким образом, математическая модель группы барабанных котлов, линеаризованная в окрестностях возможных режимов функционирования, может быть представлена системой матричных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ff; \\ y = Cx; \end{cases} \quad (15)$$

где x – вектор переменных внутренних состояний системы; y – вектор контролируемых параметров (выход системы), u – вектор управляющих воздействий, f – вектор основных возмущений, A, B, C, D – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей. Для синтеза оптимальной системы управления, которая обеспечивает минимум заданному критерию качества вида

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt, \quad (16)$$

где Q и R – весовые матрицы, математическая модель (15) дополняется моделью измерительных преобразователей в каналах контроля регулируемых параметров (инерционное звено первого порядка с транспортным запаздыванием).

Для процедуры синтеза цифровой АСУ математическая модель переводится из непрерывной шкалы времени в дискретную. После соответствующего преобразования ($A = e^{A\Delta t}$, $B = A^{-1}(A - I)B$, $F = A^{-1}(A - I)F$, $C = C$), система уравнений (15) представляется системой разностных уравнений с соответствующим периодом дискретности Δt :

$$\begin{cases} x_{i+1} = Ax_i + Bu_i + Ff_i, \\ y_i = Cx_i, \end{cases} \quad (17)$$

где x_i – вектор внутреннего состояния системы; y_i – вектор выхода (изменение расхода пара $\Delta D_{пп}$ для каждого котла, отклонение давления перегретого пара в общем паропроводе $\Delta P_{пп}$); u_i – изменение управляющего воздействия (положение РО по расходу газа Δh_{PO} и изменение числа оборотов привода компрессора Δn); f_i – возмущающее воздействие (изменение плотности $\Delta \rho_{иг}$ теплотворной способности газа $\Delta Q_{иг}$) (рис. 2).

Возможно два решения поставленной задачи: синтез оптимального регулятора состояния со статическим компенсатором измеряемого возмущения и синтез оптимального регулятора с динамическим компенсатором неизмеряемого возмущения.

Первое решение может быть получено путем минимизации следующего критерия качества:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \{ (z_i - y_i)^T Q (z_i - y_i) + u_i^T R u_i \}. \tag{18}$$

Откуда управляющее воздействие определяется следующим соотношением

$$u_i = -Kx_i + \bar{K}_f f_i, \tag{19}$$

где $P = LQ_2(A, B, C^T Q C, R)$ – решение уравнения Риккати второго типа, $K = R^{-1} B^T P$ – матрица регулятора, $\bar{K}_f = R^{-1} B^T [A - I - BK]^{-1} P F$ – матрица компенсатора измеряемого возмущения (теплотворная способность искусственного газа и его плотность) (рис. 4).

Численные значения коэффициентов весовых матриц Q и R определяются итеративным подбором по результатам моделирования замкнутой АСУ.

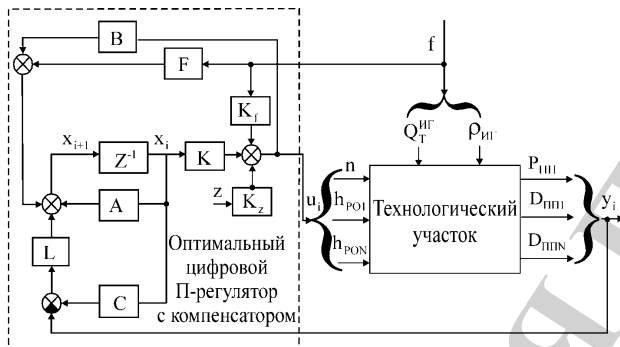


Рис. 4. Структурная схема цифровой АСУ с оптимальным ПИ-регулятором и компенсаторами измеряемых возмущений и задания

Матрица наблюдателя состояния определяется следующим соотношением

$$L = PC^T R^{-1}, \tag{19}$$

где $L^T = LQ_2(A^T, C^T, Q, R)$ – решение уравнения Риккати второго типа, Q и R – единичные матрицы соответствующей размерности.

Определив новые переменные $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$, $e_i = (z - y_i)$ (z – сигнал задания), $S_i = [e_i, \Delta x_i]^T$ и, минимизируя функционал энергии вида:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \{ e_i^T Q e_i + \Delta u_i^T R \Delta u_i \}, \tag{20}$$

можно получить решение второй задачи в виде следующей зависимости $\Delta u_i = -K_1 e_i - K_2 \Delta x_i$, что соответствует структуре дискретного ПИ-регулятора – $u_i = -K_1 \sum_{j=0}^i e_j - K_2 x_i$ (рис. 5). Так как уравнения в приращениях не зависят от векторов z и f , то для восстановления недостающих координат можно использовать обычный наблюдатель состояния

$$\Delta \bar{x}_{i+1} = \bar{A} \Delta \bar{x}_i + \bar{B} \Delta u_i + L(\Delta y_i - C \Delta \bar{x}_i),$$

где L – матрица наблюдателя состояния системы,

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [1 \ 0], \quad K = [K_1, K_2].$$

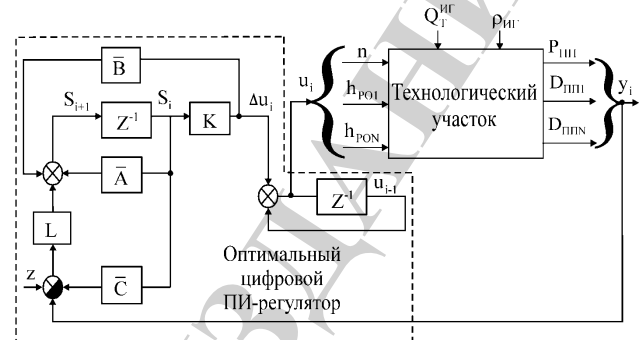


Рис. 5. Структурная схема цифровой АСУ с оптимальным ПИ-регулятором

Реализация схемы управления с компенсатором измеряемых возмущений требует быстродействующего технического устройства, которое на основании химического анализа определяет теплотворную способность и плотность газовой смеси [11].

5. Обсуждение метода построения АСУ барабанных котлов, использующих в качестве топлива искусственные газы

Предложенные технические решения являются универсальными для всех типов барабанных котлов, использующих газообразное топливо. Схема управления группой барабанных котлов с регулятором давления газа в общем газопроводе позволяет сохранить независимость АСУ отдельным котлом. Однако, колебательный переходный процесс стабилизации давления топлива будет оказывать негативное влияние на давление перегретого пара в общем паропроводе. Многомерная АСУ лишена этого недостатка, но требует надежной работы всех измерительных преобразователей и исполнительных механизмов. В процессе стабилизации давления перегретого пара многомерная АСУ напрямую изменяет производительность компрессора. В этом случае, РО котла, который работает в регулирующем режиме, может быть полностью открыт. Такое положение РО аналогично режиму минимального дросселирования в системе управления производительностью питательных турбонасосов на АЭС [15].

Необходимость прямого измерения возмущающих воздействий и наличие статической ошибки регулирования являются единственным недостатком АСУ с оптимальным многомерным регулятором состояния и компенсатором измеряемых возмущений (табл. 3). Интегральные показатели качества переходных процессов в сконструированных АСУ для группы из двух барабанных котлов типа ГМ-50 получены по результатам математического моделирования.

В критерии качества $J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^T Q y_i + u_i^T R u_i$ весовые матрицы имеют следующую структуру

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{P_{\text{III}}^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_{\text{III}}^2} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \frac{1}{n^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{h_{\text{PO}}^2} \end{bmatrix},$$

где $P_{\text{III}}=1,2$ МПа, $D_{\text{III}}=13,9$ кг/с, $n=100$ %, $h_{\text{PO}}=100$ %.

Таблица 3

Интегральные показатели качества регулирования

Показатель качества	С регулятором давления газа	С компенсатором измеряемых возмущений	Оптимальный ПИ-регулятор
$J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^T Q y_i + u_i^T R u_i$	61,9	31,6	54,2
$J_y = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^T Q y_i$	61,8	30,9	54,1
$J_u = \sum_{i=0}^{\infty} u_i^T R u_i$	0,0866	0,730	0,0757

АСУ с компенсатором измеряемого возмущения обеспечивает значение интегрального критерия J почти в два раза меньше, чем АСУ с оптимальным ПИ-регулятором. Однако величина части интегральной суммы J_u , которая учитывает вклад управляющего воздействия, больше в 9,6 раза. Таким образом, для компенсации

резких скачкообразных возмущений, АСУ с компенсатором требует большого и быстрого изменения управляющего воздействия, что должно быть учтено при ее технической реализации.

6. Выводы

1. Установлено, что одним из основных ограничивающих факторов по использованию дешевого топлива без существенной модернизации энергетического оборудования является пропускная способность регулирующего органа.

2. Определена структура устройства связи между АСУ тепловой нагрузкой и системой управления газовым компрессором. Устройство связи является пропорциональным звеном, коэффициент передачи которого зависит от теплотворных способностей природного и искусственного газов. Поэтому, на горелочные устройства должен подаваться только один вид искусственного газа, или АСУ должна быть дополнена устройством, определяющим химический состав сжигаемого топлива.

3. Показано, что по интегральным показателям многомерная оптимальная система управления группой барабанных котлов имеет преимущество над типовой АСУ тепловой нагрузки. Однако для реализации многомерного управления требуется безотказная работа всех измерительных преобразователей и исполнительных механизмов.

Литература

1. Де Варгас, М. Г. Перспективы развития мировой энергетики и ее влияние на развивающиеся страны [Текст] / М. Де Варгас // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2016. – № 7. – С. 211–224.
2. Рюль, К. ВР: Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года [Текст] / К. Рюль // Вопросы экономики. – 2013. – № 5. – С. 109–128.
3. Tanaka, K. Gas turbine combustor technology contributing to environmental conservation [Text] / K. Tanaka, K. Nishida, W. Akizuk // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2009. – Vol. 46, Issue 2. – P. 6–12.
4. Яковлев, В. Испытания работы газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой [Текст] / В. Яковлев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 299–306.
5. Кудинов, А. Влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на эффективность работы котла-утилизатора [Текст] / А. Кудинов, С. Горланов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 12. – С. 32–35.
6. Kanyuk, G. Development of the system of automatic control of steam boilers at electric power plants during combustion of low quality fuel [Text] / G. Kanyuk, A. Mezerya, I. Suk, I. Babenko, E. Bliznichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 2 (84). – P. 44–51. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85366
7. Hotchkiss, R. Co-combustion of Biomass with Coal – The Advantages and Disadvantages Compared to Purpose-built Biomass to Energy Plants [Text] / R. Hotchkiss, D. Matts, G. Riley // VGB Power Tech. – 2003. – Vol. 12. – P. 80–85.
8. Потапов, В. Анализ схем подачи генераторного газа из биомассы и отходов для сжигания в камерных топках котлов [Текст] / В. Потапов, В. Костюнин, А. Ханова, Н. Саутченко, И. Зимовец, К. Очайкин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – № 3 (11). – С. 66–72.
9. Dobrovolska, T. S. The Automated Control System of the Burning Fuel Process with a Variable Calorific Capacity for the Refining Industry [Text] / T. S. Dobrovolska, V. F. Lozhechnikov // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – Vol. 48, Issue 10. – P. 25–30. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v48.i10.30
10. Максимов, М. В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании [Текст] / М. В. Максимов, А. И. Брунеткин, А. В. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6, № 8 (66). – С. 20–27. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18702/17074>
11. Брунеткин, А. Метод определения состава горючих газов при их сжигании [Текст] / А. Брунеткин, М. Максимов // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – № 5. – С. 83–90.

12. Авдеева, О. Система экстремального регулирования горением топлива в котельной установке [Текст] / О. Авдеева // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 3 (11). – С. 167–174.
13. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике [Текст] / Г. П. Плетнев. – М.: МЭИ, 2007. – 352 с.
14. Бундюк, А. Моделирование динамики топливно-воздушного тракта когенерационной энергетической установки [Текст] / А. Бундюк, Е. Улицкая, О. Ларионова // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – № 2. – С. 122–129.
15. Северин, В. Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС [Текст] / В. Северин, Е. Никулина, Н. Трубочанова // Вісник Національного технічного університету. – 2016. – № 15 (1187). – С. 38–44.

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРВИЗДАТОМ

