

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СЖИГАНИЕМ СМЕШАННОГО ГАЗА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ ЛИСТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

При сжигании газообразного топлива важным управляющим параметром является поддержание соотношения газ–воздух, которое обеспечивается с учетом стехиометрического коэффициента газообразного топлива. При сжигании смешанного газа, в котором соотношение компонентов в газовой смеси не контролируется или стехиометрический коэффициент не является постоянным, поддержание оптимального соотношения газ–воздух является достаточно сложной задачей. Кроме того, на процесс сжигания газа оказывают влияние неконтролируемые подсосы воздуха в рабочее пространство, в котором происходит процесс сжигания. Использование поисковой системы управления позволяет определять оптимальное соотношение газ–воздух в процессе непрерывного поиска, однако работа таких систем не должна оказывать влияние на безопасность процесса. В работе рассматривается поисковая система управления сжиганием смешанного газа, которая включает две подсистемы – подсистему стабилизации и подсистему поисковой оптимизации. Каждая из подсистем представляет собой отдельный контур управления, работа которых производится последовательно. Переключение работы с одной системы на другую производится по условию, которое формируется с использованием предложенной в работе методики. При интенсивных изменениях температурных условий и соответствующих изменениях расхода газа производится управление с использованием стабилизирующей подсистемы, а при достижении параметров управляемого процесса заранее определенной зоны происходит переключение на подсистему оптимизации, которая осуществляет поиск наиболее эффективного для текущих условий соотношения газ–воздух, определяемого тепловым эффектом от сжигания. Использование рассматриваемой системы энергосберегающего управления процессом сжигания смешанного газа на одной методической печи производительностью 110 т/ч позволило уменьшить затраты условного топлива на 12,4 т/сут.

Ключевые слова: смешанный газ, теплотворная способность, коэффициент расхода воздуха, сжигание топлива, энергосбережение, двухконтурное управление, экстремальное регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

При переходе металлургических предприятий с полным технологическим циклом на непрерывную разливку стали с применением МНЛЗ появилась возможность использования коксового газа, ранее используемого для отопления нагревательных колодцев обжимных заготовочных станов, на отопление проходных печей широкополосных станов горячей прокатки, как альтернативный природному газу более дешевый вид топлива.

Это существенно снижает себестоимость производимой горячекатаной продукции, но одновременно обуславливает возникновение определенных трудностей при управлении эффективным сжиганием смешанного газа в условиях нестационарной работы нагревательных печей, неустойчивости параметров коксового газа, производимого на данном предприятии и неконтролируемой теплотворной способности смешанного газа.

Эффективное управление процессом сжигания газообразного топлива, в свою очередь, подразумевает, что в каждый момент времени должно определяться и поддерживаться такое соотношение газ–воздух, чтобы получать максимальный тепловой эффект [1]. Для решения задач по непрерывному определению и поддержанию требуемого соотношения газ–воздух используются поисковые системы автоматической оптимизации. Нестационарные условия работы печей для нагрева заготовок перед прокаткой приводят к крайне не-

стабильной работе подобных систем, что усложняет их использование при управлении объектами, управляемые параметры которых подвержены сильному влиянию возмущений [2].

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЖИГАНИЕМ СМЕШАННОГО ГАЗА

В рабочем пространстве нагревательной печи, разделенном на несколько (от 3 до 10) индивидуально управляемых зон нагрева, осуществляется двухсторонний нагрев непрерывнолитых слабовых или сортовых заготовок. Так как производительность проходных печей жестко увязана с производительностью листопркатного стана, то основной их задачей становится своевременное обеспечение процесса прокатки нагретыми заготовками. В свою очередь, при нагреве заготовок на станах горячей прокатки затрачивается около 20% всего топлива, потребляемого в металлургии, поэтому становится актуальным энергосберегающее управление процессом его сжигания [3].

При наличии достаточных объемов топлива, производимого на данном предприятии, с целью снижения себестоимости технологического процесса, в котором в качестве источника тепловой энергии используется энергия, получаемая от сжигания топлива, целесообразно вместо дорогостоящего природного газа использовать смешанный газ, состоящий из смеси природного и коксового или коксового и доменного газов. В этом случае для сжигания топлива определенного химического состава необходимо обеспечить непрерывное соблюдения соотношения между теоретическим количеством необходимого для сжигания воздуха $V_B^T(\tau)$,

объемом смешанного газа $V_{CM}(\tau)$ и управляющим воздействием $Y(\tau)$ от контура управления соотношением и выраженное в виде некой функциональной зависимости:

$$V_B^T(\tau) = F[V_{CM}(\tau), Y(\tau)], \text{ при } V_B^T(\tau) \in (V^B, V^H), \quad (1)$$

где V^B, V^H – соответственно верхнее и нижнее значения диапазона изменения расхода воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для систем отопления печей, в которых производительность воздушного вентилятора недостаточна, в качестве ведущего параметра используется расход воздуха, а ведомым параметром будет являться расход смешанного газа. В этом случае принципиального изменения в стратегии управления не будет. Величины расходов газа и воздуха в соотношении меняются местами.

Типовая система управления соотношением расходов газообразного топлива и воздуха строится по схеме объемного пропорционирования, которая основана на определении и стабилизации величины коэффициента расхода воздуха $\alpha(\tau)$, являющегося управляющим воздействием $Y(\tau)$:

$$\alpha_B(\tau) = \frac{V_B(\tau)}{L_0 V_{CM}(\tau)}, \quad (2)$$

где $V_B(\tau)$ – текущее значение расхода воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; L_0 – коэффициент, равный количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сжигания 1 м^3 смешанного газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$ (конкретное значение этого параметра зависит от химического состава отопительного газа [4]); $V_{CM}(\tau)$ – текущее значение расхода смешанного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Результатом сжигания топлива нагревательной печи является нагрев рабочего пространства. В общем случае текущая температура рабочего пространства $t_{rp}(\tau)$ определяется: величиной расхода смешанного газа, величиной расхода воздуха, величиной внешних случайных технологических возмущений $\delta(\tau)$ [5].

Внешними случайными возмущениями $\delta(\tau)$ являются: изменение производительности прокатного стана от 50 до 750 т/ч [3]; изменение давления коксового газа в общем газопроводе от 5,2 до 6,2 кПа; изменение теплотворной способности (калорийности) коксового газа от 3515 до 3560 ккал/м³ [4]; изменение начального теплового состояния непрерывнолитых заготовок от 20 до 700°C [3, 5] и изменение расхода природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Простая и широко используемая система автоматической стабилизации $\alpha_B(\tau)$ путем объемного пропорционирования расходов газа и воздуха имеет существенный недостаток.

Для используемых на печах двухпроводных или плоскопламенных типов горелок в зависимости от используемого вида топлива и конструктивного исполнения горелок существует нелинейная зависимость рационального технологически обоснованного текущего значения $\alpha_B(\tau)$ от текущего расхода топлива. Конкретный вид такой зависимости для двухпроводных горелок, используемых для сжигания природного газа, представлен на **рис. 1**. Так, при малых расходах газа требуется увеличивать количество подаваемого воздуха для лучшего их перемешивания за счет обеспечения большой кинетической энергии потока [4].

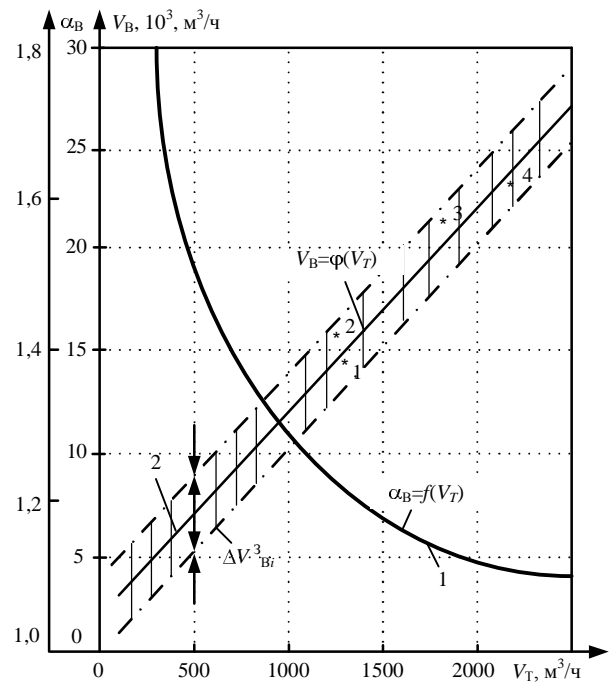


Рис. 1. Зависимость эффективного значения коэффициента расхода воздуха α_B от расхода смешанного газа: 1 – $\alpha_B = f(V_T)$; 2 – $V_B = \phi(V_T)$

Основной проблемой использования соотношения (2) для управления процессом сжигания является погрешность измерения количества воздуха, подающегося на горелочные устройства из-за наличия потерь воздуха на участке между измерительным устройством и горелкой, а также участия в процессе горения кислорода из рабочего пространства, в которое подсасывается воздух из атмосферы. Только при достаточно больших (более 2000 $\text{м}^3/\text{ч}$) расходах топлива значение α_B достаточно стабильно на уровне 1,05–1,1, когда обеспечивается нормальная работа системы объемного пропорционирования [6].

В условиях нестационарного режима работы печей проходного типа расходы топлива в зонах нагрева достаточно часто изменяются, и технолог-оператор просто физически не способен устанавливать заданное рациональное значение α_B . Поэтому реально устанавливается завышенное значение α_B , способное обеспечивать удовлетворительное сжигание газа во всем диапазоне его наиболее вероятного изменения [7, 8]. Это обстоятельство способствовало использованию на современных печах импульсного управления температурным режимом, когда двухпроводные горелки работают в зоне устойчивого значения α_B при максимальных расходах топлива. Тепловой режим при этом обеспечивается включением числа горелок.

Вторым значительным возмущающим фактором, усложняющим эффективное управление процессом сжигания смешанного газа, является изменение его химического состава, которое, в свою очередь, приводит к изменению его теплотворной способности (калорийности), а с другой стороны, к изменению стехиометрического коэффициента. Причиной этому является не только изменение во времени давления и расхода коксового газа, но и изменение расхода природного газа, что представлено на **рис. 2** для одной из печей широкополосного стана горячей прокатки [9, 10].

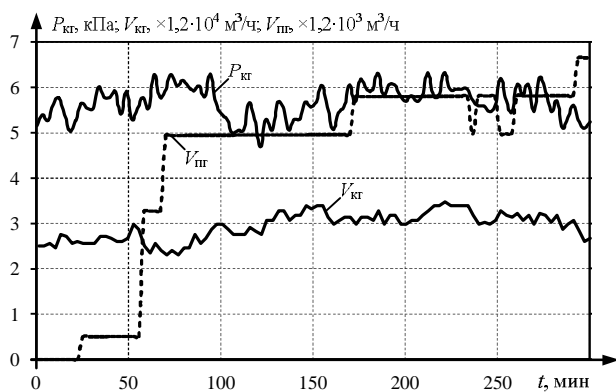


Рис. 2. Изменение во времени давления коксового газа $P_{кг}(\tau)$, расхода природного газа в смесь $V_{пг}(\tau)$ и коксового газа в смесь $V_{кг}(\tau)$ для нагревательной печи стана горячей прокатки

Определение текущей калорийности смешанного газа осуществляется в соответствии с выражением

$$\bar{Q}_{см}(\tau) = \frac{V_{пг}(\tau)\bar{Q}_{пг} + V_{кг}(\tau)\bar{Q}_{кг}}{V_{см}(\tau)}, \quad (3)$$

где $V_{см}(\tau)$, $V_{пг}(\tau)$, $V_{кг}(\tau)$ – контролируемые текущие расходы смешанного, природного и коксового газов, $\text{м}^3/\text{ч}$; $\bar{Q}_{пг}$, $\bar{Q}_{кг}$ – усредненные величины теплотворной способности природного и коксового газов, $\text{ккал}/\text{м}^3$.

Рациональное технологически обоснованное энергосберегающее текущее заданное значение расхода воздуха в индивидуально управляемую зону печи может быть определено в соответствии с выражением

$$V_{Bi}^3(\tau) = \alpha_{Bi}(\tau)L_i(\tau)V_{смi}(\tau), \quad (4)$$

где $\alpha_{Bi}(\tau)$ – рациональное в соответствии с рабочей характеристикой горелки $\alpha_{Bi}(\tau) = f[V_{смi}(\tau)]$ (см. рис. 1) значение коэффициента расхода воздуха для текущего значения теплотворности смешанного газа $\bar{Q}_{см}$; $L_i(\tau) = \mu[\bar{Q}_{см}(\tau)]$ – коэффициент, учитывающий суммарное количество воздуха, необходимого для получения каждой 1000 ккал тепловой энергии (примерно $0,9-1 \text{ м}^3$) из текущей калорийности $\bar{Q}_{см}$ смешанного газа [4]; $V_{смi}(\tau)$ – текущий расход смешанного газа в отапливаемую i -ю зону печи, $\text{м}^3/\text{ч}$.

При реализации типового способа пропорционирования расходами газа и воздуха по зонам нагревательной печи сигнал управления на клапан воздуха формируется с использованием стандартного закона управления, например ПИ-регулятором. Рассогласование контура, подаваемого на ПИ-регулятор, формируется в соответствии с выражением [11]

$$\varepsilon(\tau) = V_{Bi}^3(\tau) - V_{Bi}(\tau), \quad (5)$$

где $V_{Bi}(\tau)$, $V_{Bi}^3(\tau)$ – текущие действительное и заданное значения расходов воздуха в i -ю зону проходной нагревательной печи, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, при типовом способе управления подачей воздуха на сжигания топлива, не учитывается действие возмущений как со стороны изменения химического состава газа (и его теплотворной способности), так и со стороны системы контроля действительного количества воздуха, подаваемого на горелки, а также

неконтролируемых возмущений, заключающихся в подсосе воздуха в рабочее пространство печи из атмосферы. Эти недостатки типовой системы пропорционирования не позволяют добиться автоматического поддержания максимально возможного теплового эффекта при сжигании газообразного топлива при нестационарных условиях работы [3, 10].

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКОВОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

В основу предлагаемой помехоустойчивой автоматической системы энергосберегающего, минимизирующего затраты топлива, управления процессом сжигания заложено наличие унимодальной зависимости температуры в рабочем пространстве нагревательной печи от расхода воздуха, которая была бы достигнута в стационарном режиме работы нагревательной печи. Такая зависимость будет являться статической характеристикой процесса сжигания топлива.

Также статические характеристики процесса сжигания топлива могут быть получены как зависимости температуры греющей среды (факела), измеряемой пирометром полного излучения, от расхода воздуха. Для двухпроводной горелки при различных постоянных расходах смешанного газа и различных условий теплообмена экспериментально получены статические характеристики сжигания топлива, представленные на рис. 3. При определении каждой статической характеристики обеспечивалась стационарность работы нагревательной печи в течение часа.

При малой производительности печи при расходе газа $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$ температура греющей среды выше, чем при расходе $2100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и высокой производительности. Экстремумы температуры постоянно смещаются (дрейфуют) в зависимости от условий теплообмена и расхода газа.

При управлении процессом сжигания газа от системы управления требуется поиск и поддержание условий, при которых достигается максимальный тепловой эффект от сжигания. Так как управляемым параметром является только расход воздуха на сжигание топлива, то компенсация всех возмущающих воздействий на процесс сжигания должна осуществляться целенаправленным изменением расхода воздуха. Поддержание максимального теплового эффекта от сжигания топлива приведет, в свою очередь, к снижению расхода топлива при стабилизации температуры по зонам нагревательной печи.

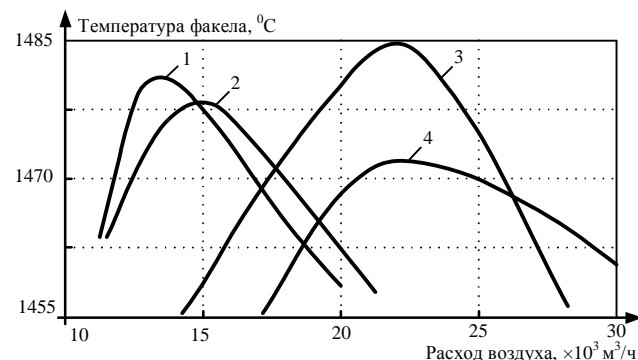


Рис. 3. Зависимости температуры греющей среды от расхода воздуха при различных расходах газа в стационарных условиях: линии 1, 2 – при $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$; линия 3 – при $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$; линия 4 – при $2100 \text{ м}^3/\text{ч}$ для второй сварочной зоны проходной печи толкательного типа

Для решения задачи формирования поискового режима управления используется система экстремального регулирования (СЭР), теоретические основы работы которых разработаны российским ученым В.В. Казакевичем [12,13]. Поисковый режим работы СЭР осложнен дополнительно тем, что текущее положение экстремума и форма статической экстремальной характеристики оптимизируемого процесса не определены и неизвестны. В известных СЭР [14] обычно совмещены поисковое и рабочее управляющие воздействия. Поэтому для таких СЭР характерен периодический (колебательный) поисковый режим работы. Такой режим работы нельзя признать удовлетворительным, поскольку он способствует преждевременному износу контрольно-управляющих технических средств (датчиков и исполнительных механизмов) [15, 16].

С целью исключения периодического поискового режима работы СЭР процесса сжигания газа, обеспечения помехоустойчивости от действия низкочастотных технологических возмущений и подавления высокочастотных помех в информационных каналах предлагается использовать двухконтурную СЭР управления энергосберегающим режимом сжигания смешанного газа. Каждый контур в такой СЭР представляет собой управляющую расходом воздуха подсистему, работа которой происходит последовательно, в соответствии с методикой, в которой условия переключения определяются в зависимости от текущего состояния процесса сжигания.

Первая подсистема реализует контур стабилизации управляемого параметра, который и обеспечивает быстрое, но «грубое» определение величины расхода воздуха. Переключение на работу первой подсистемы производится при резком изменении расхода газа, которое возникает при действии технологического возмущения, которое формирует контур стабилизации температуры, например, при загрузке или входа в зону ненагретой заготовки [17, 18].

Вторая подсистема реализует контур оптимизации, который обеспечивает точный, но более медленный вывод процесса сжигания топлива на оптимальный энергосберегающий режим в заданной зоне ΔV_{Bi}^3 , составляющий 5-8% от максимального расхода воздуха V_{Bi}^{MAX} для i -й зоны.

Для целей управления и контроля со стороны технологического персонала использование характеристики $\alpha_{Bi}(\tau) = f[V_{CMi}(\tau)]$ является более удобной в виде зависимости $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CMi}(\tau)]$. В такой форме данная характеристика представлена на **рис. 1**, линия 2.

Заданная зона работы оптимизирующего контура $\Delta V_{Bi}^3(\tau)$, определяемая как директивный параметр, на **рис. 1** заштрихована и точками в этой зоне показаны экстремумы статических характеристик, изображенных на **рис. 3**.

Принцип действия, положенный в методику переключения подсистем стабилизации и оптимизации при энергосберегающем управлении процессом сжигания смешанного газа представлен на **рис. 4**.

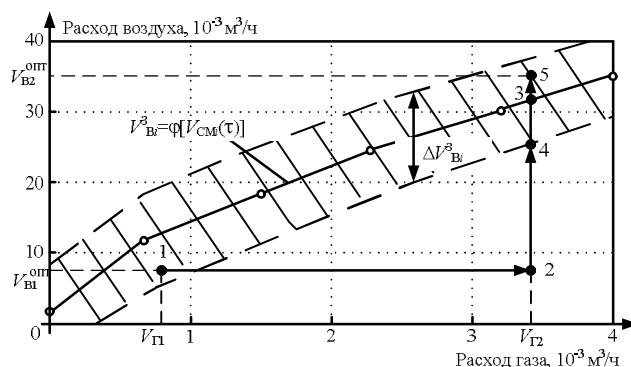


Рис. 4. Принцип работы переключения подсистем в двухконтурной системе управления расходом воздуха

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Для каждой индивидуально отапливаемой и управляемой зоны печи методом экспертных оценок определяется рациональная рабочая характеристика $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$, изображенная на **рис. 4** сплошной линией.

2. Пусть в начальный момент времени для расхода газа $V_{Г1}$ было определено и поддерживалось оптимальное значение расхода воздуха V_{B1} (точка 1). При изменении регулятором температуры расхода газа до значения $V_{Г2}$ процесс оказывается в точке 2, которая лежит вне области, определяющей рациональное значение расхода воздуха. На **рис. 1** и **4** эти области заштрихованы.

3. При выходе значения $V_B(\tau)$ из зоны $\Delta V_{Bi}^3(\tau)$ (на **рис. 4** заштрихованная область) в работу оперативно включается стабилизирующая подсистема, в которой в соответствии с зависимостью $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$ для текущего значения $V_{Г2}$ устанавливается требуемое значение расхода воздуха, соответствующее точке 4.

4. При достижении значения расходом воздуха границы ΔV_B^3 в точке 4 происходит переключение работы подсистем и включается в работу подсистема оптимизации, в которой в соответствии с используемым оптимизирующим алгоритмом управления (ОАУ) в пределах зоны ΔV_B^3 осуществляется определение оптимального расхода воздуха (точка 5) [17].

Если принять величину ΔV_B^3 равной нулю, то в работе будет использован только стабилизирующий контур, осуществляющий управление в соответствии с реализацией зависимости $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$, определяемой точкой 3.

СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ СМЕШАННОГО ГАЗА

Структурная схема поисковой автоматической системы управления процессом сжигания смешанного газа представлена на **рис. 5**. Система управления включает в себя две подсистемы, каждая из которых реализует независимый контур управления: стабилизирующий и оптимизирующий контур.

Стабилизирующий контур содержит датчики текущих расходов газа ДТ и воздуха ДВ с нормирующими преобразователями и вторичными приборами ВП. Функциональный преобразователь ФП осуществляет формирование значения требуемого расхода воздуха в соответствии с рабочей характеристикой:

$$V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]. \quad (6)$$

Значение сигнала $V_{Bi}^3(\tau)$ сравнивается в элементе сравнения ЭС с величиной $V_{Bi}(\tau)$, соответствующей действительному текущему расходу воздуха. На выходе элемента сравнения формируется сигнал ΔV_B в соответствии с условием

$$\Delta V_{Bi}(\tau) = V_B(\tau) - V_{Bi}^3(\tau). \quad (7)$$

Сигнал $\Delta V_B(\tau)$ одновременно подается на вход стабилизирующего регулятора и на вход логического элемента сравнения ЛЭС.

Стабилизирующий регулятор в соответствии с принятым ПИ-законом управления формирует управляющее воздействие $\sigma_1(\tau)$, поступающее на логическое переключающее устройство ЛПУ, осуществляющее текущий выбор работы стабилизирующего или оптимизирующего контура.

В ЛЭС осуществляется сравнение текущего значения сигнала $\Delta V_{B_i}(\tau)$ с заданным $\Delta V_{B_i}^3(\tau)$, определяющим разрешенный диапазон работы оптимизирующего контура, формируемый задающим устройством ЗУ.

На выходе ЛЭС формируется логический управляющий сигнал $\sigma_{\text{L}}(\tau)$, определяющий выбор режима управления расходом воздуха $\Delta V_{\text{В}}(\tau)$ в соответствии с условием

$$\sigma_0(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } -\frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2} \geq \Delta V_{Br}(\tau) \geq \frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2}; \\ 0, & \text{если } -\frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2} < \Delta V_{Br}(\tau) < \frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

Информационный сигнал для оптимизирующего контура формируется датчиком температуры T , который в зависимости от типа горелок является либо оптическим пирометром для двухпроводного типа [19, 20], либо термопарой для сводовых плоскопламенных горелок [3, 4]. Сигнал с датчика температуры, преобразованный нормирующим преобразователем НП, подается на вход оптимизатора.

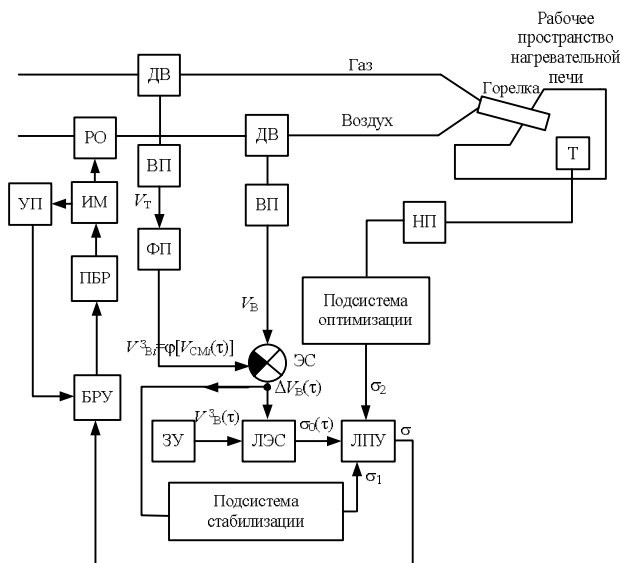


Рис. 5. Структурная схема двухконтурной энергосберегающей системы автоматического управления процессом сжигания газообразного топлива

Оптимизатор осуществляет определение и поддержание энергосберегающих условий сжигания топлива в пределах разрешенной зоны $\Delta V_{\text{Вг}}^3(\tau)$ с использованием одного из видов оптимизирующих алгоритмов управления, подробно изложенных в работах [24, 25]. Управляющее воздействие оптимизирующего контура формируется в виде функции $\sigma_2(\tau) \in (+1, 0, -1)$.

Управляющие сигналы стабилизирующего контура $\sigma_1(\tau)$ и оптимизирующего контура $\sigma_2(\tau)$ подаются на вход логического переключающего устройства ЛПУ, на выходе которого формируется сигнал $\sigma(\tau)$, определяющий выбор режима управления процессом сжигания топлива в соответствии с условием

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} \sigma_1(\tau), & \text{если } \sigma_0(\tau) = +1; \\ \sigma_2(\tau), & \text{если } \sigma_0(\tau) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Сигнал $\sigma(\tau)$ подается на вход блока ручного управления БРУ, осуществляющего: переключение режима дистанционного или автоматического управления; ручное-кнопочное управление движением исполнительного механизма ИМ; индикацию прохождения команд «открыто», «закрыто» и текущего положения регулирующего органа РО в процентах хода 0-100%.

Бесконтактный реверсивный пускатель ПБР обеспечивает управление исполнительным механизмом ИМ по сигналам с выхода БРУ.

Для определения реального эффекта от работы предлагаемой энергосберегающей системы процессом сжигания смешанного газа с теплотворной способностью 5000 ккал/м³ был произведен анализ работы нагревательной печи, управление процессом горения на трех (основных) зонах нагрева осуществлялось рассматриваемой системой.

Снижение средних расходов газа по всем трем зонам составило:

$$\Delta V_{CM} = 365 \text{ m}^3/\text{ч} + 252 \text{ m}^3/\text{ч} + 229 \text{ m}^3/\text{ч} = 846 \text{ m}^3/\text{ч}.$$

При допустимых регламентированных простоях стана 3,3 ч снижение расхода смешанного газа на одну печь составило: $846 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 20,7 = 17512 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Количество условного топлива будет
 $17512 \cdot (5000/7000) = 12433 \text{ кг/сут.}$ Годовая экономия
 условного топлива при 330 рабочих сутках на одну печь
 составляет: $12433 \cdot 330 = 4102890 \text{ кг/год} = 4103 \text{ т/год.}$

Использование предлагаемой системы управления рассчитано на программную реализацию и не требует дополнительных значительных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная система автоматического энергосберегающего управления процессом сжигания смешанного газа при нестационарном режиме работы нагревательной печи и переменной неконтролируемой теплотворности смешанного газа позволяет без существенных затрат заметно повысить эффективность управления процессом сжигания топлива.

Использование двух последовательно работающих подсистем позволяет повысить устойчивость управления процессом сжигания топлива, а значение величины зоны работы оптимизирующей подсистемы является

настроечным параметром, позволяющим определять моменты переключения подсистем. Использование оптимизирующего контура позволяет полностью исключить субъективное вмешательство технологического персонала в режим управления энергоемким процессом сжигания топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Генкин А.Л. Проблемы энергосберегающего управления листопркатным комплексом. Ч.1 // Проблемы управления. 2006. № 6. С.50-54.
- Ariyur K.B. Real-time optimization by extremum-seeking control / K.B. Ariyur, M. Krstic // New-Jersey: Wiley and Sons, 2003. 326 p.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.
- Линчский В.П. Топливо и его сжигание. М.: Metallurgizdat, 1959. 400 с.
- Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкция печей черной металлургии. М.: Металлургия, 1989. 462 с.
- Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович, Г.К. Захаров, М.Д. Климовицкий, А.М. Сегаль. М.: Металлургия, 1981. 196 с.
- Генкин А.Л. Информативность энергосиловых параметров при управлении температурно-скоростным режимом горячекатаной полосы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 8. С. 45-48.
- Арутюнов В.В., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. 2014. №6. С. 134-143.
- Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace / H. Zhu, Z. Wen, X. Wang, H. Xu, S. Tao // Journal of Thermal Science. 2002. Vol. 11. No. 3. Pp. 271-276. doi: 10.1007/s11630-002-0065-6
- Васильев М.И., Власов Д.Л., Васильев И.И. Анализ и сравнение основных входных регулирующих воздействий на ПИД-регулятор // Автоматизированные технологии и производства. №2(16). 2017. С. 35-39.
- Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
- Казакевич В.В., Щербина Ю.В. О построении непрерывно-дискретных систем экстремального регулирования, устойчивых при действии низкочастотных возмущений // Автоматика и телемеханика. 1979. № 2. С. 59-64.
- Самарина И.Г., Толстова Ю.С., Газизова В.А. Система экстремального регулирования с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №2(20). С. 14-18.
- Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилова Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 63-69. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69
- Толстова Ю.С., Газизова В.А., Мухина Е.Ю. Обзор систем управления температурой в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1(19). С. 29-31.
- Прасолов А.С., Самарина И.Г., Бондарева А.Р. Моделирование системы экстремального регулирования на языке LAD // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №1(21). С. 22-26
- Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace / A. Yan, T. Chai, F. Wu, P. Wang // Journal of Control Theory and Applications. 2008. Vol. 6. No. 1. Pp. 80-85. doi: 10.1007/s11768-008-7001-6
- Цимбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
- Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1(7). С. 9-12.

Поступила в редакцию 10 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY-SAVING AUTOMATED CONTROL OF MIXED GAS COMBUSTION IN HEATING THROUGH-TYPE FURNACES OF SHEET ROLLING MILLS

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, promkim@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Sergey M. Andreev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ig_samarina@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

The important control parameter for the combustion of gaseous fuels is the maintenance of the gas-air ratio, which is provided by taking into account the stoichiometric coefficient of the gaseous fuel. During combustion of the mixed gas, the ratio of components in the gas mixture is not controlled, or the

stoichiometric factor is not constant, the maintaining of optimal gas - air ratio is quite difficult. In addition, the combustion of gas is affected by uncontrolled air leaks in the working space where a combustion process takes place. The use of a control search engine makes it possible to determine the optimal gas-air ratio

during the continuous search, but the operation of such systems should not affect the safety of the process. The two subsystems, the stabilization subsystem and the search engine, are considered in the paper. Each of the subsystems is a separate control circuit that works sequentially. The switching of operation from one system to another is carried out according to the condition, which is formed using the method proposed in the work. In case of intensive temperature condition changes and corresponding gas flow changes, control should be carried out by using the stabilizing subsystem and, upon reaching the parameters of the controlled process of the predetermined zone, it will be switched to the optimization subsystem, which searches for the most efficient gas-air ratio for the current condition determined by the thermal effect from combustion. The use of the energy-saving mixed gas combustion control system under consideration in a single methodical furnace with the capacity of 110 tonnes/h made it possible to reduce conventional fuel costs by 12.4 tonnes/day.

Keywords: mixed gas, calorific value, air flow coefficient, fuel combustion, energy saving, dual-loop control, extremum control.

REFERENCES

- Genkin A.L., Kudelin A.R. Problems of Energy-saving Control of Sheet Mill. Part 1. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2006, no. 6, pp. 50-54. (In Russian)
- Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. New-Jersey, Wiley and Sons, 2003. 326 p.
- Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa* [Optimization of Control Modes of Heating Through-type Furnaces]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, 375 p. (In Russian)
- Lincheskiy V. P. *Toplivo i yego szhiganiye* [Fuel and fuel combustion]. Moscow, Metallurgy Publ., 1959, 400 p. (In Russian)
- Krivandin V.A., Yegorov A.V. *Teplovaya rabota i konstruktivnaya pechey chernoy metallurgii* [Thermal production and construction of steel furnaces]. Moscow, Metallurgy, 1989, 462 p. (In Russian)
- Buglak L.I., Volfman I.B., Yefroymovich S.YU., Zakharov G.K., Klimovitskiy M.D., Segal A.M. *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechey* [Automation of continuous furnaces]. Moscow, Metallurgy, 1981, 196 p. (In Russian)
- Genkin A.L. Information Capacity of Power Parameters in Controlling the Temperature and Speed Mode of Hot Strip. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2008, no. 8, pp.45-48. (In Russian)
- Arutyunov V.V., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovooy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical Modeling of Thermal Performance of Industrial Furnaces]. Moscow, Metallurgy Publ., 1990, 239 p. (In Russian)
- Andreev S.M., Parsunkin B.N. Pilot study of efficiency of energy saving optimum metal heating modes. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2014, no. 6, pp. 134-143. (In Russian)
- Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace. *Journal of Thermal Science*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 271-276. doi: 10.1007/s11630-002-0065-6
- Vasilyev M.I., Vlasov D.L., Vasilyev I.I. Analysis and comparison of the main input regulatory actions on the PID regulator. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2017, no. 2(16), pp. 35-39. (In Russian)
- Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii* [Systems of automatic optimization]. Moscow, Energiya, 1977, 288 p. (In Russian)
- Kazakevich V.V., Shcherbina YU. V. On the construction of continuous-discrete systems of extreme control, stable under the action of low-frequency disturbances. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1979, no. 2, pp. 59-64. (In Russian)
- Samarina I.G., Tolstova Yu.S., Gazizova V.A. The system of extreme regulation with storing the maximum rate of change of the output parameter. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2019, no. 2, pp. 14-18. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Vasilyev M.I., Sibileva N.S. Energy-saving automatic fuzzy pressure control in the working space of heating furnaces. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 63-69. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69 (In Russian)
- Tolstova Yu.S., Gazizova V.A., Mukhina E.Yu. The review of methods and measuring instruments of metal level in continuous-casting machines crystallizer. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2019, no. 1(19), pp. 21-24. (In Russian)
- Prasolov A.S., Samarina I.G., Bondareva A.R. Modeling of the extreme control system in the LAD language. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020 no. 1(21), pp. 22-26. (In Russian)
- Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 80-85. doi: 10.1007/s11768-008-7001-6
- Tsimbal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie metalurgicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgy, 1986. 240 p. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Selecting the temperature setting for the operational control of metal heating in continuous furnaces. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2015, no. 1(7), pp. 9-12. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Самарина И.Г. Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станов // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 68-74. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-68-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74)

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Samarina I.G. Energy-saving Automated Control of Mixed Gas Combustion in Heating Through-Type Furnaces of Sheet Rolling Mills. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 68-74. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-68-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74)