

ного моделирования; использоваться для конструктивных расчетов энергоутилизирующих и газоочистных установок. Обязательно создание расширяемых баз данных, которые будут содержать нормативную, конструкторскую, теплофизическую и энергетическую документацию. Особую ценность будут иметь разработанные расширяемые базы данных, содержащие уже выполненные на этом программном комплексе расчеты. Это позволит не только накапливать проекты возможных вариантов энергоутилизации, но и мгновенно выбирать среди них наиболее оптимальный.

Список использованных источников

1. Войнов А. П., Зайцев В. А., Куперман Л. И., Сидельковский Л. Н. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты. – М.: Энергоиздат, 1989. – 272 с.
2. Курунов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. М.: Черметинформация, 2002. – 198 с.
3. Оленников А. А., Цымбал В. П. Варианты и оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов для агрегатов жидкофазного восстановления // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2008. № 6. С. 43–51.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 2-е изд., стереотип. М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Оленников А.А. Математическое моделирование и комплекс программ для решения задач утилизации вторичной энергии отходящих газов металлургических агрегатов струйно-эмульсионного типа: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18. – Новокузнецк, 2009. – 129 с.
6. Оленников А. А., Цымбал В. П. Комплекс моделей и программ для оптимизации вторичной энергии металлургических процессов прямого восстановления // Творческое наследие Б. И. Китаева: труды междунар. науч.-практ. конф. (11–14 февраля 2009 г.). Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. – С. 232–236.

УДК 669.042

Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Б. К. Сеничкин, О. С. Логунова

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОКСА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

Аннотация

В работе рассмотрено решение задачи динамической оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь с целью минимизации удельного количества кокса на тонну выплавленного чугуна в условиях использования технологического кислорода на обогащение дутья.

Ключевые слова: доменная печь, природный газ, технический кислород, кокс, автоматическое управление, системы оптимизации, поисковые системы, контроллеры.

Abstract

The paper considers the solution of dynamic optimization control natural gas feed to the blast furnace to minimize the specific amount of coke per ton of pig iron in terms of technological use oxygen enrichment of blast.

Keywords: blast furnace, natural gas, technical oxygen, coke, automatic system, optimization system, search system, optimizing control, controller.

В настоящее время определены приоритетные направления в развитии науки, технологии и техники, определяющие рациональное природопользование и развитие информационных систем. Современные металлургические производства вынуждены использовать природные ресурсы и их эффективное использование во многом определяется оптимальной работой систем управления. Повышение эффективности автоматизированных систем управления требует разработки новых методов, способов и технологий на различных стадиях подготовки и использования металлургического сырья [1; 2].

Снижение удельного количества дорогостоящего и дефицитного кокса в условиях высокопроизводительного доменного производства является актуальной задачей. Альтернативными энергетическими заменителями кокса как источника тепловой энергии в доменном процессе могут быть угольная пыль, коксовый и природный газ. Наибольший эффект с экономической точки зрения при использовании в доменной плавке представляют угольная пыль и коксовый газ [3]. Вдувание угольной пыли имеет существенный недостаток, связанный с организацией пылеподготовки и подачей угольной пыли в доменную печь. Подача коксового газа с организационной точки зрения более удобна и проста, но также требует осуществления трудоемких процедур по очистке газа и повышению давления.

С целью определения эффективной замены кокса природным газом в условиях доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») были проведены исследования по определению зависимостей влияния удельного количества природного газа на величину удельного количества кокса при различных величинах удельного количества кислорода, используемого для обогащения дутья [3]. Полученные зависимости приведены на рис. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что для каждого значения удельного количества кислорода, подаваемого для обогащения дутья, существует унимодального типа и экстремального вида зависимость удельного количества кокса на тонну чугуна от удельного количества природного газа. Это означает, что в зависимости от величины удельного количества технологического кислорода существует такое оптимальное значение удельного количества природного газа, при котором удельное количество кокса минимально. Наличие зависимостей подобного вида является обоснованием возможности и целесообразности применения для оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь системы автоматической оптимизации управления (САОУ), способной в условиях неопределенности вида и положения статической характеристики оптимизируемого процесса (см. рис. 1) определять и поддерживать текущее экстремальное (в данном случае минимальное) значение оптимизируемого параметра – «удельное количество кокса».

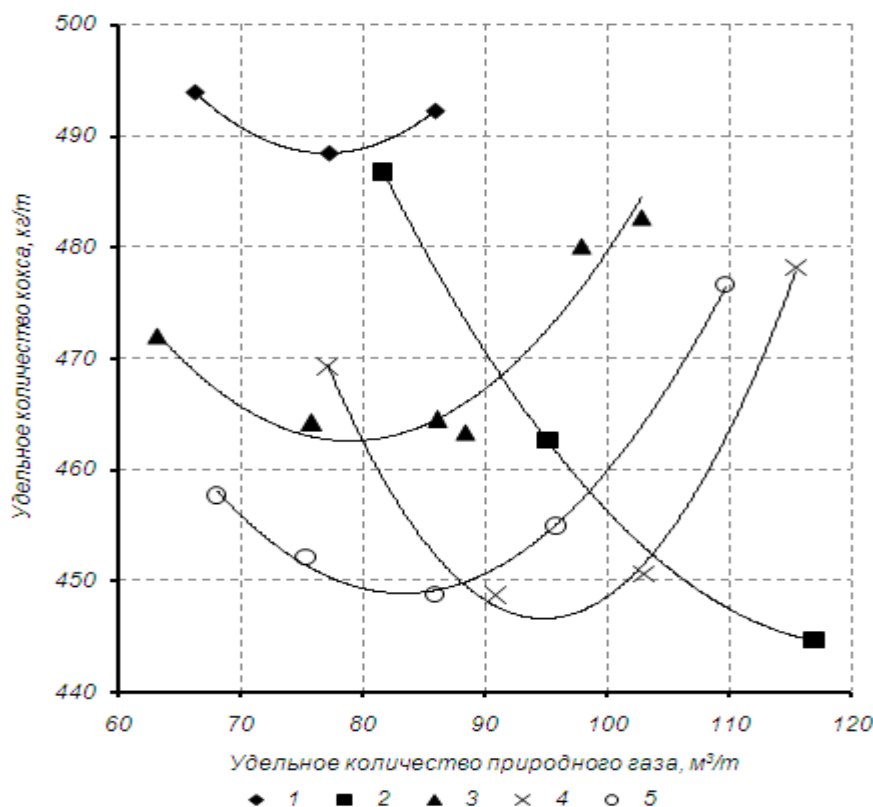


Рис. 1. Зависимости удельного количества кокса от удельного количества природного газа при различных величинах удельного количества технологического кислорода на обогащение дутья: 1 – при 40÷50 м³/т; 2 – при 120÷140 м³/т; 3 – при 60÷79 м³/т; 4 – при 110÷119 м³/т; 5 – при 80÷99 м³/т

Учитывая значительную инерционность и запаздывание процесса по каналу «расход природного газа – удельное количество кокса», когда постоянная времени T_0 составляет от 6 до 10 часов при времени запаздывания τ_3 от 1 до 3 часов [4], при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь необходимо использовать САОУ дискретного принципа действия. Когда управляющее воздействие по изменению расхода природного газа следует менять через интервал времени $T_{ш} \geq T_0 + \tau_3$.

Поскольку в производственных условиях вид и положение статической характеристики оптимизируемого процесса (см. рис. 1) не определены и неизвестны, то в шаговой САОУ подачей природного газа используется поисковый режим работы, суть которого заключается в следующем:

1) на вход оптимизируемого технологического процесса (объекта управления – ОУ) подается дискретное (ступенчатое) управляющее воздействие (расход природного газа, м³/ч);

2) затем через интервал времени $T_{ш}$ определяется реакция (отклик) оптимизируемого процесса на внесенное управляющее воздействие;

3) если изменение оптимизируемого параметра соответствует приближению к цели оптимизации управления (удельное количество кокса уменьшается), то принятое направление изменения расхода природного газа считается правильным и должно быть сохранено на по-

следующем шаге управления, в противном случае на следующем шаге направление управляющего воздействия следует изменить на противоположное.

Структурная схема шаговой САОУ подачей природного газа в доменную печь представлена на рис. 2.

Объект управления аппроксимирован последовательным соединением статического звена с экстремальной характеристикой $Y = f(x)$ и двух инерционных звеньев с постоянными времени T_0 – характеризующей инерционные свойства процесса и τ_3 – определяющей время запаздывания. Правомерность замены передаточной функции звена запаздывания передаточной функцией инерционного звена определена соблюдением условия $T_0 \gg \tau_3$ [5].

Дискретный режим работы шаговой САОУ обеспечивается генератором импульсов (ГИ), который синхронно управляет работой двух импульсных элементов ИЭ1 и ИЭ2 (ключей), формируя импульсный режим воздействия входного управляющего параметра в соответствии с выражением

$$x(\tau) = x_n + \sigma(\tau) \cdot K_{ИМ} \cdot \Delta\tau_{И},$$

где x_n , $x(\tau)$ – начальное и текущее значение управляющего входного воздействия (расхода природного газа); $\sigma(\tau) \in (-1; +1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление изменения управляющего воздействия; $\Delta\tau_{И}$ – продолжительность управляющего воздействия в пределах одного шага; $K_{ИМ}$ – скорость изменения управляющего воздействия (скорость исполнительного механизма (ИМ) расхода природного газа).

Выходной сигнал $Z(\tau)$, пропорциональный текущему значению удельного количества кокса, элементами задержки Z^1 и сравнения ЭС1 преобразуется в приращение этого сигнала $\Delta Z(\tau)$, которое через импульсный элемент ИЭ1 подключается на вход запоминающего устройства (ЗУ) и одновременно на вход элемента сравнения ЭС2.

Программно реализованное ЗУ выполнено таким образом, что оно способно запоминать только минимальное значение $\Delta Z^{min}(\tau-1)$, достигнутое в прошедший момент времени в соответствии с условием:

$$\text{если } \Delta Z(\tau) < \Delta Z^{min}(\tau-1), \text{ то } \Delta Z^{min}(\tau-1) = \Delta Z(\tau), \text{ иначе } \Delta Z^{min}(\tau-1) \text{ не изменяется.}$$

На выходе ЭС2 формируется текущее значение сигнала, пропорционального текущему изменению приращений $\Delta Z^*(\tau) = \Delta Z(\tau) - \Delta Z^{min}(\tau-1)$ относительно минимального значения, достигнутого в предыдущие моменты времени. Сигнал $\Delta Z^*(\tau)$ подается на вход логического устройства сигнум-реле (СР), на выходе которого формируется управляющая функция:

$$U = \begin{cases} +1, & \text{если } \Delta Z(\tau) - \Delta Z^{min}(\tau-1) - \Delta Z_n^* \leq 0, \\ -1, & \text{если } \Delta Z(\tau) - \Delta Z^{min}(\tau-1) - \Delta Z_n^* > 0, \end{cases}$$

где ΔZ_n^* – заданная зона нечувствительности сигнум-реле для предотвращения ложных срабатываний при действии случайных помех.

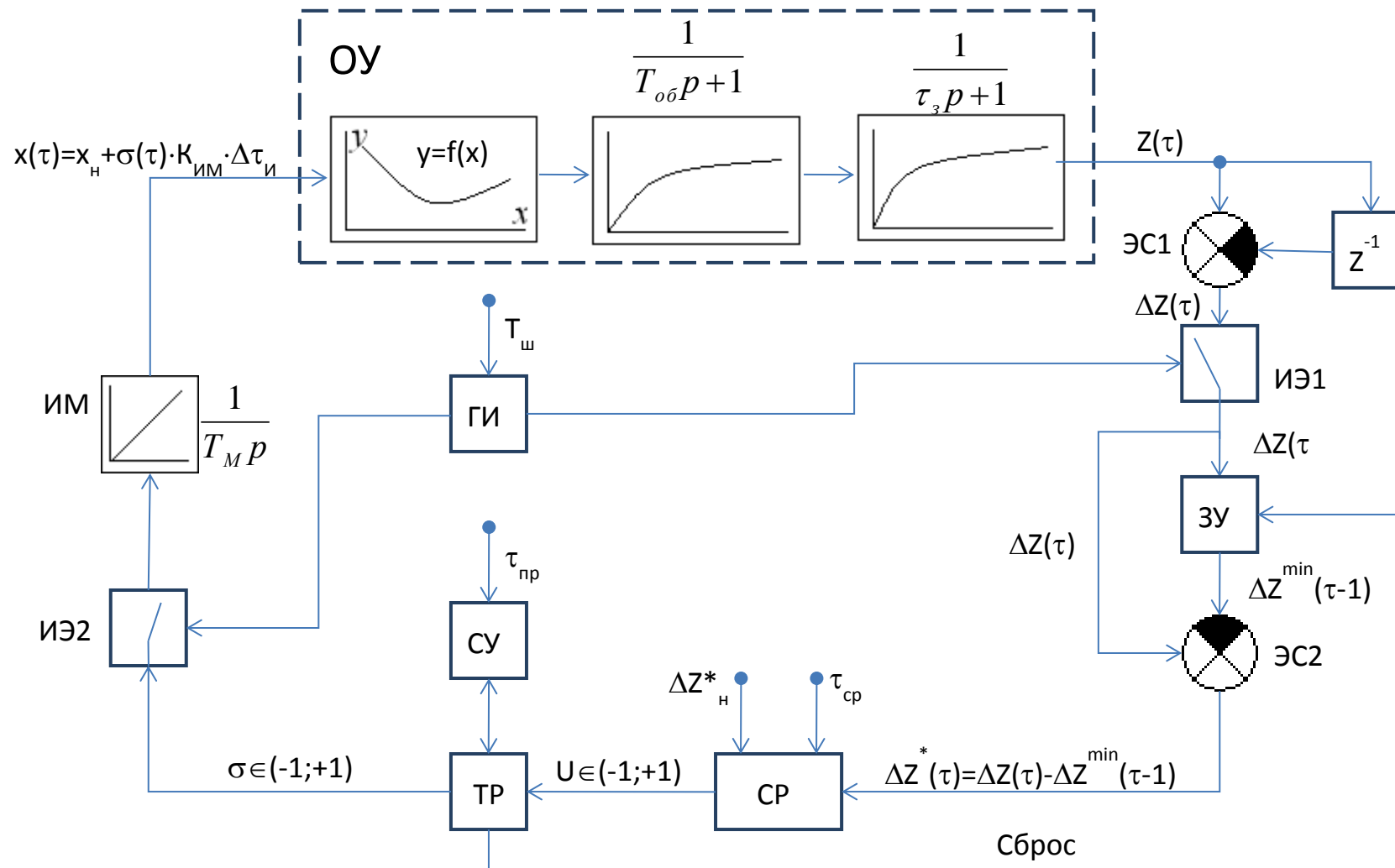


Рис. 2. Структурная схема шаговой САОУ расходом природного газа в доменную печь

Импульсный сигнал $U(\tau) = -1$ перебрасывает программно реализованный триггер-реверс (ТР) из одного устойчивого состояния в другое. На выходе ТР формируется переключающая функция $\sigma(\tau) \in (-1; +1)$, определяющая текущее направление изменения входного управляющего воздействия $x(\tau)$ при работе исполнительного механизма (ИМ) с постоянной скоростью $K_{ИМ} = 100/T_m = const$, где T_m – время перемещения ИМ из одного крайнего положения – 0 % хода до другого – 100 % хода, ограниченных конечными выключателями.

Связь между управляющей функцией $U(\tau)$ и переключающей $\sigma(\tau)$ определяется условием:

$$\sigma(\tau+1) = \begin{cases} \sigma(\tau), & \text{если } U(\tau) = +1, \\ -\sigma(\tau), & \text{если } U(\tau) = -1, \end{cases}$$

где τ и $\tau+1$ – текущий и последующий моменты времени по шагам управления.

Основное правило работы рассматриваемой шаговой САОУ подачей природного газа в доменную печь формируется следующим образом:

1) изменение направления управляющего воздействия необходимо производить в том случае, когда текущее приращение оптимизируемого параметра увеличивается по сравнению с минимально достигнутым в прошедший период $(\tau-1)$ на величину, большую, чем принятая зона нечувствительности ΔZ_n^* ;

2) при срабатывании ТР, т. е. при изменении знака $\sigma(\tau)$ запоминаемое значение в ЗУ $\Delta Z^{min}(\tau-1)$ сбрасывается и запоминается текущее значение $\Delta Z(\tau)$;

3) для прерывания монотонного постоянного управляющего воздействия при наличии возмущений в шаговой САОУ предусмотрено стабилизирующее устройство (СУ), которое осуществляет принудительный поверочный реверс (переброску ТР) через заданный интервал времени $\tau_{пр} = 2,5 \div 3 \cdot (T_0 + \tau_3)$. Отсчет времени принудительного реверса $\tau_{пр}$ начинается с момента очередного реверса, формируемого СР при $U(\tau) = -1$;

4) с целью исключения повторного (ложного) реверса, вызванного значительной инерционностью и запаздыванием оптимизируемого процесса в СР, предусмотрен запрет повторного реверса в течение времени выдержки сигнум-реле $\tau_{СР} = 0,6 \div 0,9 \cdot (T_0 + \tau_3)$, отсчет которого начинается с момента $U(\tau) = -1$;

5) импульсный (шаговый) режим работы ИМ формируемый ГН, реализуется во времени в соответствии с выражением

$$T_{ш} = \Delta\tau_{ш} = (\Delta\tau_{и} + \Delta\tau_{п}) \geq T_3 = (T_0 + \tau_3),$$

где $\Delta\tau_{ш}$ – продолжительность одного шага управления; $\Delta\tau_{и} \ll \Delta\tau_{п}$ – продолжительность управляющего импульса и продолжительность паузы; T_3 – эквивалентная постоянная времени, принятая для удобства моделирования поискового режима работы шаговой САОУ.

Допустим, что при постоянном удельном количестве технологического кислорода в начальный момент времени при $\tau = 0$ оптимизируемый процесс характеризуется состоянием $Z_0 = y_0 = f(x_0)$. Это означает, что процесс находится в установившемся состоянии определяемом точкой A (см. рис. 3, а). Траектория поискового процесса, реализуемая шаговой САОУ подачей природного газа в доменную печь, представлена на рис. 3, а и рис. 3, б.

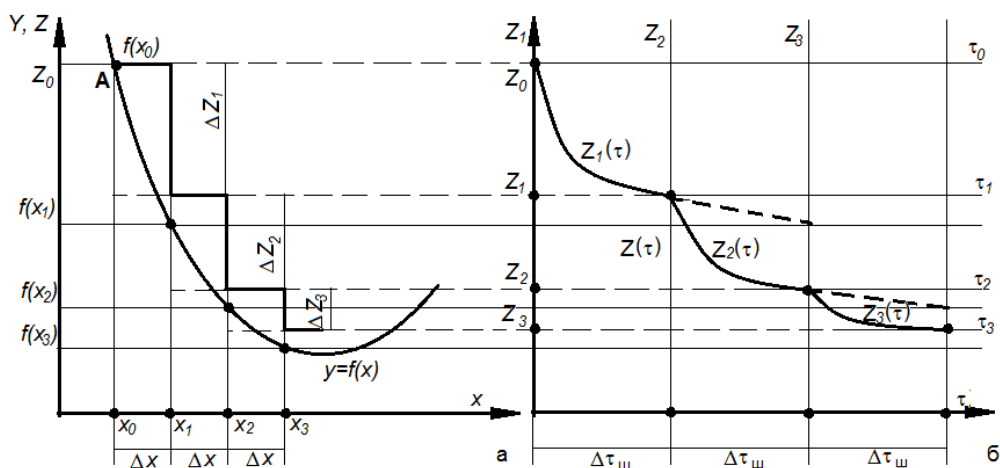


Рис. 3. Траектории поискового процесса шаговой САОУ подачей природного газа в доменную печь: *а* – траектория в плоскости « $Y(x), Z(x) - x$ »; *б* – траектория изменения во времени выходного оптимизируемого параметра $Z(\tau)$ при шаговом режиме управления

На рис. 3 обозначено: x – управляющий параметр – удельное количество природного газа в доменную печь; Y и Z – установившиеся и текущие значения оптимизируемого параметра – удельное количество кокса при текущем значении x .

После первого шага ИМ величина управляющего параметра будет $x_1 = x_0 + \Delta x$, где $\Delta x = \sigma(\tau) \cdot K_{\text{ИМ}} \cdot \Delta \tau_{\text{И}}$. В инерционном оптимизируемом процессе начинается переходный процесс, определяемый уравнением

$$T_3 \frac{dZ(\tau)}{d\tau} + Z(\tau) = f(x_1) - f(x_0).$$

В результате решения этого уравнения получим:

$$Z(\tau) = [f(x_1) - f(x_0)] \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_3}} \right), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\text{ш}},$$

где $\tau_{\text{ш}}$ – текущее время в пределах одного шага управления. Следовательно, перед следующим очередным шагом ИМ выходной параметр оптимизируемого процесса (см. рис. 3, *а*) примет значение

$$Z(\tau) = Z_0 + \Delta Z_1, \quad \text{где } \Delta Z_1 < 0.$$

Аналогично можно определить траектории изменения $x(\tau)$, $Z(\tau)$ и $Y(\tau)$ в процессе поискового режима. Изменение траектории $Z(\tau)$ во времени в процессе поискового режима представлено на рис. 3, *б*.

Для теоретического обоснования работоспособности предлагаемой шаговой САОУ расходом природного газа, определения предварительных величин настроечных параметров была создана рабочая программа оптимизации управления процессом подачи природного газа в доменную печь, обеспечивающая возможность математического моделирования и реализацию оптимизирующего управления процессом в реальных производственных условиях.

При математическом моделировании работы шаговой САОУ расходом природного газа в качестве показателей эффективности и качества были использованы параметры (см. рис. 4):

- потери на поиск $Z_n(\tau)$, кг/т;
- величина поисковых колебаний удельного количества природного газа в предельном режиме ΔA_x , м³/т;
- величина поисковых колебаний удельного количества кокса в предельном периодическом режиме ΔA_z , кг/т;
- время выхода на предельный оптимальный режим работы $\tau_{\text{вых}}$, ч.

В качестве настраиваемых основных параметров шаговой САОУ расходом природного газа при постоянной производительности доменной печи использованы:

- время паузы между последовательными шагами управляющих воздействий – $T_{\text{ш}}$, ч;
- величина шага изменения управляющего воздействия – Δx , м³/т.

Статическая характеристика оптимизируемого процесса при удельном количестве кислорода в дутье $69 \div 70$ м³/т (см. рис. 1) определяется уравнением:

$$\bar{Y}(x) = -0,0000191 x^4 + 0,006603 x^3 - 0,817 x^2 + 42 x - 338,0012,$$

где $\bar{Y}(x)$ – установившееся значение удельного количества кокса, кг/т; x – величина удельного количества природного газа при $x \in [60; 105]$ м³/т.

При моделировании приняты значения, приведенные в таблице.

Значения параметров, принятых для математического моделирования работы шаговой САОУ подачей природного газа в доменную печь

№	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Постоянная времени, T_0	6	ч
2	Время запаздывания, τ_3	1	ч
3	Продолжительность цикла управления, $T_{\text{ш}}$	2 ÷ 10	ч
4	Изменение величины управляющего воздействия, Δx	2 ÷ 5	м ³ /т
5	Дискретизация расчета, $\Delta \tau_{\text{ш}}$	0,1	ч
6	Зона нечувствительности системы, ΔZ_n^*	0,5	кг/т

Траектория изменения удельного количества кокса в процессе поискового режима работы шаговой САОУ представлена на рис. 4.

Зависимость величин ΔZ_n , ΔA_z , ΔA_x от величины времени паузы между управляющими импульсами при $\Delta x = 3 \div 5$ м³/т = const, полученные в результате моделирования поискового процесса при функционировании шаговой САОУ и величине удельного количества кислорода в диапазоне $60 \div 79$ м³/т, представлены на рис. 5.

В производственных условиях необходимая информация при определении текущих величин удельных количеств кокса и природного газа для обеспечения функционирования рассматриваемой шаговой САОУ расходом природного газа поступает по интерфейсному каналу связи из системы централизованного контроля параметров доменного процесса. Опре-

деление удельного количества кокса и природного газа осуществляется на каждом шаге оптимизирующего поискового режима.

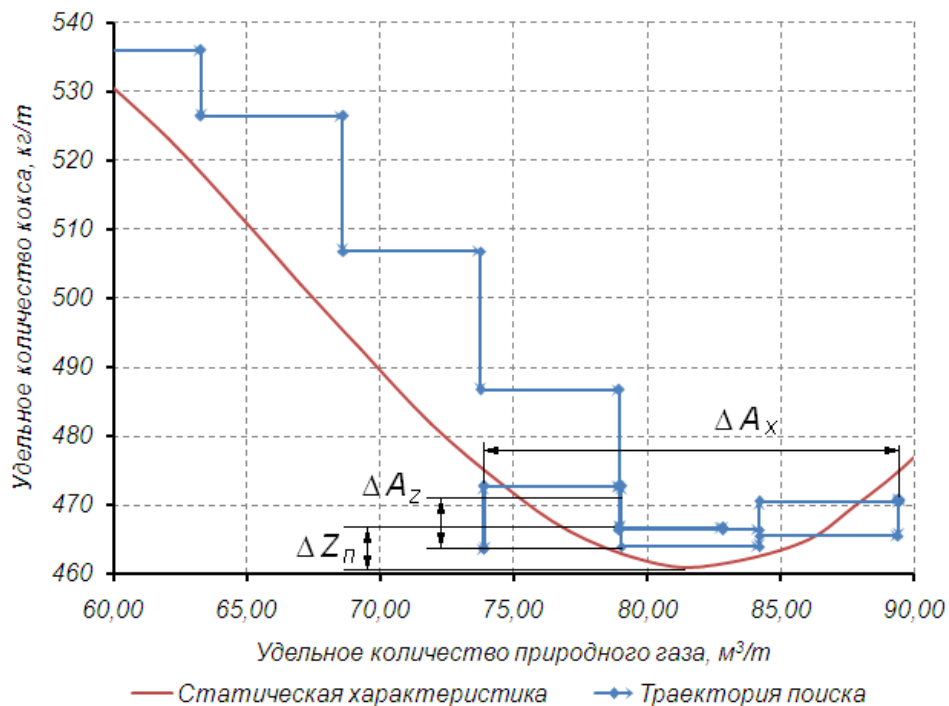


Рис. 4. Расчетная траектория $Z(x)$ изменения удельного количества кокса в процессе поискового режима работы шаговой САОУ при $T_{ш} = 6$ ч и $\Delta x = 5$ м³/ч

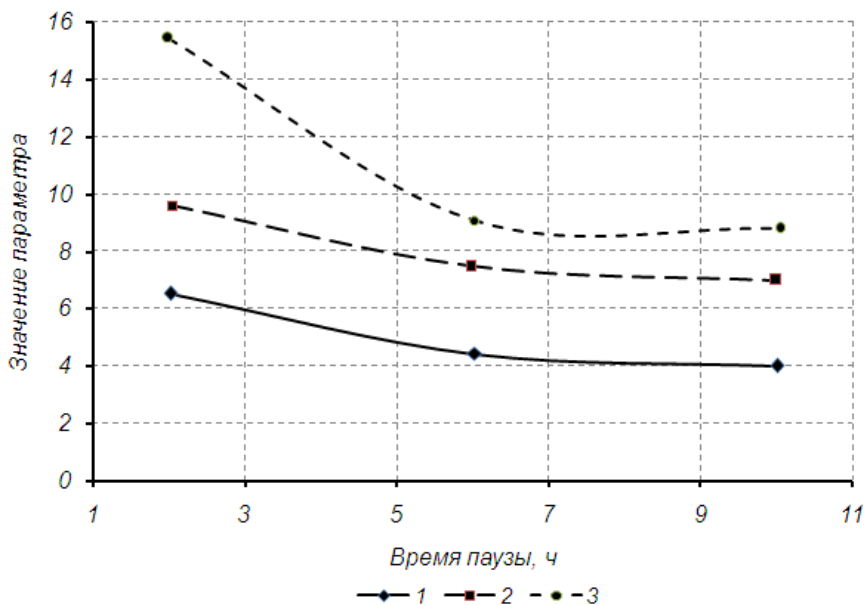


Рис. 5. Зависимость величин показателей качества поискового режима от величины времени паузы между управляющими импульсами при функционировании шаговой САОУ удельным количеством природного газа в доменную печь при $\Delta x = 5$ м³/т: 1 – ΔZ_p ; 2 – ΔA_z ; 3 – ΔA_x

Анализ полученных зависимостей показывает, что при $T_{ш} \geq T_0 + \tau_3$ показатели качества, благодаря значительной инерционности оптимизируемого процесса, остаются практически постоянными при заданной величине зоны нечувствительности.

Использование предлагаемого метода автоматической оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь позволяет свести к минимуму вмешательство технологического персонала в режим управления этим энергоемким процессом. Предлагаемый метод ориентирован на программную реализацию и при использовании для управления процессом доменной плавки современных микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК) не требует дополнительных ресурсов, кроме затрат на дополнительное усовершенствование программного обеспечения. Ориентировочный расчет показывает, что за счет повышения оперативности и автоматической оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь минимальное ожидаемое снижение удельного количества кокса составит $0,6 \div 1,8$ кг/т.

Список использованных источников

1. Андреев С. М., Парсункин Б. Н., Головкин Н. А., Усачев М. В., Полько П. Г., Логунова О. С. Разработка концепции экстремальной нечеткой системы автоматической оптимизации управления энергетическим режимом выплавки стали в ДСП // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2011. – № 3. – С. 88–91.

2. Рябчиков М. Ю., Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Полько П. Г., Логунова О. С., Рябчикова Е. С., Головкин Н. А. Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2011. – № 4. – С. 65–69.

3. Яковлев Ю. В., Марсуверский В. А., Манаенко И. П., Бабарыкин Н. Н., Сенчикин Б. К. Исследование доменной плавки при использовании окатышей и комбинированного дутья // Производство чугуна: межвузовский сборник. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1982. Вып.8. – С. 71–186.

4. Товаровский И. Г., Райх Е. И., Шкочин К. К., Улахович В. А. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. – М.: Металлургия, 1978. – 264 с.

5. Фрер Ф., Ортенберг Ф. Введение в электронную технику регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 190 с.