

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухонослова Т.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АДАПТИВНОЕ ПОИСКОВО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДУТЬЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Производительность современной доменной печи составляет 3–4 тыс. т/сут, поэтому поддержание ровного хода доменной печи, обеспечивающего максимальную производительность, является основной задачей технологического персонала. Многочисленные факторы, действующие на процесс выплавки чугуна, нарушают ход процесса и требуют формирования компенсирующих управляющих воздействий. Воздействия на ход доменного процесса возможны как изменением подачи материалов (воздействия «сверху»), так и изменением дутьевого режима (воздействия «снизу»). Воздействия через изменения дутьевого режима, по сравнению с воздействиями при изменении подачи шихты, позволяют оперативно компенсировать нарушения хода доменного процесса. Одним из главных параметров при управлении дутьевым режимом плавки является подача природного газа (ПГ) и кислорода (К) в фурменную зону печи. В зависимости от действий внешних факторов максимальная производительность доменной печи достигается при разном соотношении ПГ/К. В работе, используя метод экстремального регулирования, разработана система поискового динамического управления подачей природного газа, в которой в автоматическом режиме производится оценка изменения текущей производительности доменной печи и формируется управляющее воздействие на коррекцию соотношения ПГ/К в направлении максимизации текущей производительности доменной печи. Учитывая большую инерционность и запаздывание процесса производства чугуна, предложен способ шагового изменения управляющего воздействия с учетом динамики процесса. В работе приведена реализация поискового алгоритма и выполнено математическое моделирование работы системы поисково-динамического управления. Использование предложенного алгоритма позволит повысить оперативность управления подачей природного газа в доменную печь.

Ключевые слова: доменная печь, производство чугуна, поисково-динамическое управление, адаптивное управление, автоматическое управление, система автоматической оптимизации управления, оптимальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение максимальной производительности доменной печи, составляющая 3–4 тыс. т/сут чугуна, является основной задачей технологического персонала [1–3]. Основным фактором, который обеспечивает достижение максимальной производительности, является «ход печи». Под этим понятием понимается скорость схода шихты по шахте доменной печи. Ровный ход печи обеспечивает равномерное движение шихты по всему сечению шахты доменной печи. Для того чтобы добиться ровного хода печи, необходимо учитывать взаимосвязи энергетических, химических и механических процессов, оказывающих влияние на производительность доменной печи [4–6].

Для обеспечения ровного хода доменной печи на технологический процесс выплавки чугуна оказывают различные управляющие воздействия, основными из которых являются подача компонентов шихты и их распределение (управление сверху), подача горячего дутья, обогащенного кислородом и добавление природного газа (управление снизу) [7].

Обогащение горячего дутья кислородом и подача в дутье природного газа способствует повышению производительности доменной печи и снижению удельных затрат кокса [8]. Однако влияние соотношения удельного расхода природного газа к расходу технического кислорода в дутье ($V_{\text{ПГ}}/V_{\text{ТК}}$) и удельного расхода кислорода $V_{\text{ТК}}$ на производительность доменной печи является неоднозначным [9, 10]. Расход природного газа в дутье является ведомым параметром по отношению к расходу кислорода. Природный газ в дутье выполняет функции повышения количества теплоты, дувяемого в доменную печь горячим дутьем, за счет сгорания [11]. Однако процессы диссоциации молекул природ-

ного газа являются эндотермическими и являются ограничивающим фактором увеличения удельного расхода природного газа.

Неоднозначность влияния соотношения $V_{\text{ПГ}}/V_{\text{ТК}}$ на производительность доменной печи требует применять для управления расходом природного газа в горячее дутье поисковые системы управления. Работа такой системы должна обеспечить нахождение и поддержание такого соотношения $V_{\text{ПГ}}/V_{\text{ТК}}$, чтобы производительность доменной печи достигала максимальной при текущих условиях работы [12].

Необходимым и обязательным условием эффективного применения поисково-динамического управления является наличие экстремальной унимодальной (без разрывов производной) статической технологически обоснованной зависимости между «оптимизируемым параметром» (часовой производительностью печи) и «управляющим воздействием» (удельным количеством природного газа).

Для условий доменного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при постоянном удельном количестве потребляемого кокса экспериментальные зависимости часовой производительности доменной печи от соотношения удельных количеств природного газа к удельным количествам потребляемого технического кислорода ($V_{\text{ПГ}}/V_{\text{ТК}}$) для различных величин удельных количеств $V_{\text{ТК}}$ представлены на рис. 1 [9, 13].

Экстремумы (максимумы) производительности $P_{\text{ДП}}$ при изменении $V_{\text{ТК}}$ смещаются по нелинейной траектории. Поэтому для достижения максимальной производительности доменной печи $P_{\text{ДП}}^{\text{max}}$, учитывая значительную инерционность доменного процесса, целесообразно использовать дискретный (шаговый) поисково-динамический метод оптимизации управления удельным количеством потребляемого природного газа $V_{\text{ПГ}}$ [9, 14, 15].

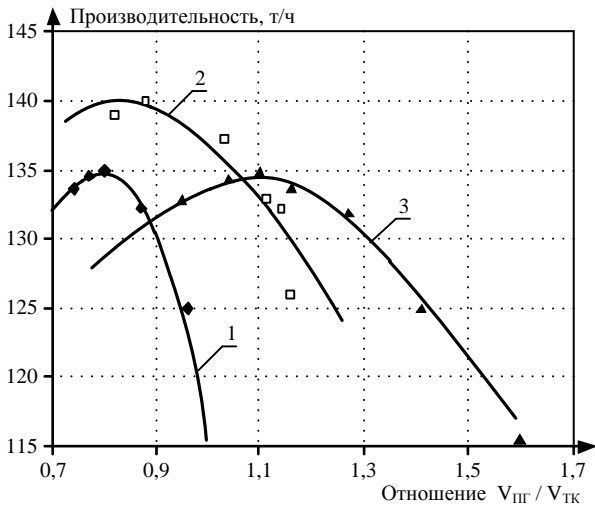


Рис. 1. Зависимость производительности доменной печи от соотношения удельных количеств природного газа $V_{ПГ}$ и технологического кислорода $V_{ТК}$ при различных величинах $V_{ТК}$: 1 – 80-99 м³/т чугуна; 2 – 100-119 м³/т чугуна; 3 – 120-140 м³/т чугуна.

Формирование направления шагового режима реализации управляющего воздействия основано на выполнении главного определяющего эвристического правила: если текущее направление изменения шага управляющего воздействия привело к приближению оптимизируемого параметра к поставленной цели (увеличилось), то такое направление должно быть сохранено и на последующем шаге, иначе, направление управляющего воздействия на последующем шаге должно быть изменено на противоположное.

Поскольку в реальных производственных условиях вид и количественные параметры текущих статических характеристик оптимизируемых процессов обычно неизвестны, то для решения поставленной задачи целесообразно использовать адаптивный динамический поисковый метод определения экстремума.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНО-ПОИСКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Структурная схема цифровой реализации метода поисково-динамического адаптивного управления подачей природного газа с целью достижения текущей максимально возможной производительности доменной печи представлена на рис. 2.

На рис. 2 обозначены: ОУ – объект управления со статической характеристикой $Y=f[X(\tau)]$ и постоянная времени T_0 с запаздыванием τ_3 ; ИЭ1 и ИЭ2 – импульсные элементы; ЗУ1 и ЗУ2 – запоминающие устройства; ЭС1 и ЭС2 – элементы сравнения; СР – логический элемент сигнум-реле; ТР – триггер реверса; ГИ – генератор импульсов; УОП – устройство остановки поиска; УКПП – устройство контроля продолжительности паузы; УОП1 – нормально разомкнутые контакты ключей остановки; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ГПГ – газопровод природного газа.

Импульсный режим работы метода обеспечивается ГИ, формирующим шаговый режим с продолжительностью цикла $\Delta\tau_{ци} = \Delta\tau_{и} + \Delta\tau_{п}$. Здесь $\Delta\tau_{и}$ – продолжительность управляющего воздействия, то есть время движения ИМ, $\Delta\tau_{п} = (0,5 \dots 2) \cdot T_0$ – продолжительность паузы между управляющими импульсами, где $T_0 = T_0 + \tau_3$ – эффективная эквивалентная постоянная времени.

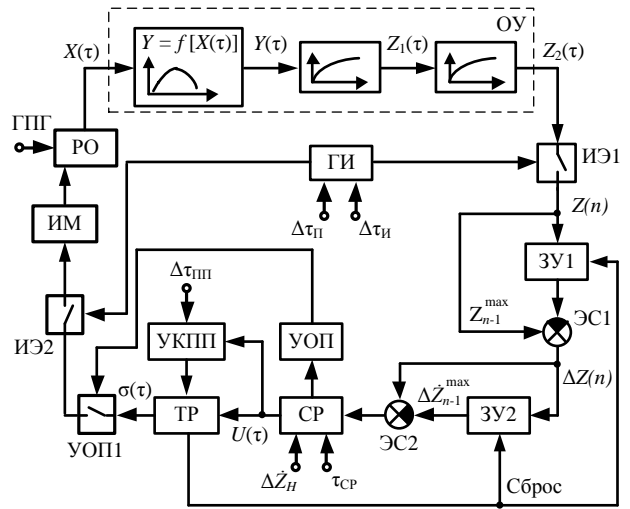


Рис. 2. Структурная схема цифровой реализации метода поисково-динамического адаптивного управления подачей природного газа для достижения максимальной производительности доменной печи

Математическая модель статических и динамических свойств оптимизируемого процесса представляется последовательным соединением трех звеньев: экспериментальной статической характеристикой $Y=f[X(\tau)]$ и двух инерционных звеньев с постоянными времени T_0 и τ_3 . Правомерность замены запаздывания инерционностью первого порядка обеспечены соблюдением условия $T_0 \gg \tau_3$ [16].

Изменение величин $Z_j(\tau)$ ($j = 1, 2$ – номер инерционного звена) на выходе инерционностей в пределах одного шага управления $\Delta\tau_{ц}$ определяется из решения дифференциальных уравнений методом Эйлера [16]. Так, при движении ИМ за время $\Delta\tau_{и}$ изменение управляющего воздействия будет

$$\Delta x = \sigma(\tau) K_{ИМ} \Delta\tau_{и}, \tag{1}$$

где $\sigma(\tau) \in (-1, 0, 1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление его движения; τ – текущее время; $K_{ИМ}$ – техническая скорость ИМ; $\Delta\tau_{и}$ – время движения ИМ.

Изменение оптимизируемого параметра может быть определено из решения уравнения

$$T_0 \frac{dZ_j(i)}{d\tau} + Z_j(i) = f[X(\tau)] \text{ при } 0 \leq \tau \leq \tau_{и}, \tag{2}$$

$$j = 1, 2,$$

где Z_j – значение выходного сигнала после j -й инерционности; i – номер шага дискретизации расчета; $f[X(\tau)]$ – значение по статической характеристике; $X(\tau) = X_0 + \sigma(\tau) K_{ИМ} \Delta\tau_{и}$ – текущее значение управляющего воздействия; X_0 – начальное значение $X(\tau)$.

При остановке ИМ в течение паузы $\Delta\tau_{п}$ при $X(\tau) = \text{const}$ уравнение имеет вид [15]:

$$T_0 \frac{dZ_j(i)}{d\tau} + Z_j(i) = \text{const}, \text{ при } \Delta\tau_{и} < \tau \leq \Delta\tau_{ци}. \tag{3}$$

Контролируемое аналоговое (непрерывное) значение текущей часовой производительности доменной печи $Z_2(\tau) = P_{ДП}(\tau)$ импульсным элементом ИЭ1 преоб-

разуется в последовательность импульсов $Z(n)$ амплитудой $Z_2(\tau)$ с продолжительностью $\Delta\tau_{II}$ и паузой $\Delta\tau_{II}$ между импульсами.

Импульсы $Z(n)$ одновременно поступают на входы ЗУ1 и ЭС1. Запоминающее устройство ЗУ1 запоминает и формирует на выходе только максимальное значение Z_{n-1}^{\max} , достигнутое в текущий или прошедший шаг управления, в соответствии с условием:

$$Z_{n-1}^{\max} = \begin{cases} Z_n, & \text{если } Z(n) > Z_{n-1}^{\max}; \\ Z_{n-1}, & \text{если } Z(n) \leq Z_{n-1}^{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

На выходе ЭС1 формируется значение приращения $\Delta Z(n)$ в соответствии с выражением

$$\Delta Z(n) = Z(n) - Z_{n-1}^{\max}. \quad (5)$$

Для снижения негативного влияния инерционности и устранения появления ложных экстремумов [15], характерных для методов поиска по запоминанию экстремума оптимизируемого параметра, целесообразно в качестве запоминаемого параметра использовать его относительные приращения $\Delta Z(n)$ за один шаг поиска [6].

Это реализуется элементами ЗУ2 и ЭС2 в соответствии с выражением (9). Элемент ЗУ2 работает аналогично элементу ЗУ1.

$$\Delta \dot{Z}(n) = \Delta Z(n) - \Delta Z_{n-1}^{\max}, \quad (6)$$

где $\Delta \dot{Z}(n)$ – величина изменения приращения в пределах шага поиска.

Использование метода поиска экстремума по запоминанию максимума приращений [17] позволило значительно сократить время выхода поискового процесса в окрестности экстремума. Но это не устранило второго нежелательного явления: наличия периодического (автоколебательного) режима работы в стационарном состоянии доменного процесса при отсутствии заметного смещения статической характеристики.

Устранение отмеченного недостатка в предлагаемой адаптивной системе (см. рис. 2) обеспечено формированием СР управляющей функции в соответствии с условиями:

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{при } \Delta \dot{Z}(n) \geq \dot{Z}_{n-1}^{\max} + \Delta Z_H; \\ 0, & \text{при } -\Delta Z_H \leq \Delta \dot{Z}(n) < \dot{Z}_{n-1}^{\max} + \Delta Z_H; \\ -1, & \text{при } \Delta \dot{Z}(n) < -\Delta Z_H, \end{cases} \quad (7)$$

где ΔZ_H – заданная зона нечувствительности принятого метода поиска экстремума.

Сигнал $U(\tau)$ с сигнум-реле управляет триггером реверса ТР, представляющим бесконтактный реверсивный пускатель, определяющий текущее состояние ИМ и значение $X(\tau)$ путем формирования переключающей функции $\sigma(\tau) \in (-1, 0, 1)$.

Между $U(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ существует логическая связь:

- если $U(\tau) = +1$, то текущее направление движения $X(\tau)$ сохраняется на последующем шаге $\sigma(\tau+1) = \sigma(\tau)$;
- если $U(\tau) = 0$, то остановить ИМ $\sigma(\tau+1) = 0$;
- если $U(\tau) = -1$, то направление движения $X(\tau)$ изменяется на противоположное на последующем шаге

$$\sigma(\tau+1) = -\sigma(\tau).$$

При $U(\tau) = 0$ срабатывает УОП, которое набором нормально разомкнутых электронных ключей УОП1 разрывает питание и цепи управления ИМ, останавливая его на заданное время паузы $\tau_{III} = (0,5 \dots 2) \cdot T_{\Omega}$.

Одновременно с остановкой поиска включается УКПП – таймер, на выходе которого по истечении заданного времени τ_{III} формируется сигнал принудительного поворочного реверса ИМ. Поиск экстремума возобновляется, но только при противоположном направлении принятому ранее на предыдущих шагах. Кроме этого, триггер реверса всегда изменяет направление поиска при условии $U(\tau) = -1$. При каждом срабатывании триггера реверса происходит сброс запомненных ранее в ЗУ1 и ЗУ2 максимальных значений и запоминание текущих на момент реверса значений. Импульсный режим движения ИМ обеспечивается ИЭ2 управляемым ГИ синхронно с ИЭ1.

Поскольку $X(\tau)$, $Y(\tau)$, $Z(\tau)$ являются функциями времени, то для удобства анализа их траекторий в процессе поиска при постоянной скорости изменения управляющего воздействия $dx/dt = K_{ИМ} = \text{const}$ возможно и целесообразно в уравнениях (2) и (3) произвести замену переменных dt на dx в соответствии с выражением $dt = dx/K_{ИМ}$. В этом случае траектории основных параметров в процессе поиска могут быть представлены в координатах « X » – « Y », « Z » совмещенными.

В производственных условиях характеристики функции $Y = f[X(\tau)]$ точно неизвестны, а известны только контролируемые значения $Z_2(X) = P_{дп}(X)$ и текущий расход природного газа Q_{II} . Уникальность и эффективность рассматриваемого адаптивного шагового поиска экстремума с остановкой поиска в окрестности экстремума заключается в следующем. Изменения величины оптимизируемого параметра за время движения ИМ ΔZ_i^I может быть получено из решения уравнения (2). За время паузы $\Delta\tau_{II}$ изменение $Z(X)$ в соответствии с решением уравнения (3) будет на величину ΔZ_i^I ($I = 1, 2, \dots, n$) за время $\Delta\tau_{II} < \tau \leq \Delta\tau_{II}$.

Общее изменение величины оптимизируемого параметра будет $\Delta Z_i = \Delta Z_i^I + \Delta Z_i^I$ за каждый i -шаг управляющего воздействия. Величина ΔZ_i в основном определяется инерционностью процесса и величиной разности текущих значений $Y = f(X_i)$ и $Z(X_i)$.

В рассматриваемом конкретном случае, учитывая инерционность доменного процесса, изменение оптимизируемого параметра за время движения ИМ, равное $\Delta\tau_{II} = 1,5 - 5$ с, будет практически нулевым. Основное изменение величины на ΔZ_i на каждом шаге будет за время паузы $\Delta\tau_{II} = 2 - 4$ ч, то есть за 2 – 4 выпуска чугуна. В системе координат « X » – « Y », « Z » эта траектория представляет две линии, параллельные осям координат.

В результате работы системы на n -шаге относительное приращение $\Delta \dot{Z}_i$ оптимизируемого параметра будет меньше приращения $\Delta \dot{Z}_{i-1}$ на величину, большую, чем заданное значение ΔZ_H . При выполнении этого условия процесс поиска прекращается на заданный интервал времени τ_{III} . В течение этого интервала времени величина оптимизируемого параметра $Z(X_i)$ приближается к установившемуся значению

$Y(X_i) \approx Y_{\text{экт}}$, где $Y_{\text{экт}}$ – экстремальное значение параметра (в нашем случае наибольшее) для текущего значения X_i .

Использование процедуры прерывания поиска позволяет устранить и регламентировать периодический режим в окрестности экстремума.

Незначительные принудительные регламентируемые поворочные реверсы необходимы для обеспечения оперативного своевременного реагирования на неконтролируемые случайные технологические возмущения, приводящие к дрейфу статической характеристики оптимизируемого процесса.

Реализуемость и эффективность теоретического и работоспособность технического обеспечения предлагаемого метода исследована и проверена в процессе математического и физического моделирования поисково-динамического управления.

Целью математического и физического моделирования являлось выявление влияния основных настроечных параметров реализованного способа управления на показатели эффективности поискового процесса:

- величины шага управляющего воздействия ΔX , м³/ч;
- продолжительность паузы $\Delta t_{\text{п}}$, ч;
- продолжительность остановки поиска $\Delta t_{\text{пп}}$, ч;
- величины зоны нечувствительности $\Delta Z_{\text{н}}$;
- максимального значения величины потери на поиск $\Delta Z_{\text{п}}$, т/ч;
- величины поисковых колебаний управляющего воздействия A_X , м³/т или м³/ч;
- величины поисковых колебаний оптимизируемого параметра A_Z , т/ч;
- времени выхода процесса в окрестности экстремума $T_{\text{вых}}$, ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ПОИСКОВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Теоретическое и алгоритмическое решение поставленной задачи обеспечено разработанной универсальной рабочей программой [18] реализации цифрового адаптивного управления подачей природного газа.

Конкретный пример математического моделирования метода адаптивной поисковой оптимизации управления расходом природного газа приведена для следующих условий. Статическая характеристика процесса при максимальном постоянном удельном количестве технического кислорода $V_{\text{ТК}}$ в диапазоне изменения расхода природного газа от 8500 до 24500 м³/ч определяется уравнением [12]

$$P_{\text{пд}}(Q_{\text{пг}}) = a_1 Q_{\text{пг}}^2 + a_2 Q_{\text{пг}} + a_3, \tag{8}$$

где $P_{\text{пд}}(Q_{\text{пг}})$ – установившееся усредненное значение текущей часовой производительности доменной печи, т/ч, при текущем расходе природного газа $Q_{\text{пг}}$, м³/ч; $a_1 = -1,8 \cdot 10^{-7}$, $a_2 = 7,04 \cdot 10^{-3}$, $a_3 = 62,6243$ – коэффициенты уравнения.

Постоянная времени процесса $T_0 = 540$ мин, время запаздывания процесса $\tau_3 = 60$ мин. Величина шага управляющего воздействия $\Delta X = 2000-2200$ м³/ч. Техническая скорость исполнительного механизма

$K_{\text{им}} = 420$ (м³/ч)/с. Зона нечувствительности системы $\Delta Z_{\text{н}} = 0,5$ т/ч. Начальное значение расхода $Q_{\text{пг}} = 9000$ м³/ч. Начальное значение часовой производительности доменной печи $P_{\text{пд}}(\tau=0) = 111,47$ т/ч. Время паузы между управляющими импульсами $\Delta t_{\text{п}} = T_0 + \tau_3 = 600$ мин. Время прерывания поиска $\Delta t_{\text{пп}} = 900$ мин. Дискретность расчета 6 мин.

Поскольку при математическом моделировании поискового процесса использована экспериментальная характеристика (траектория 3 на рис. 1) при практически постоянном удельном количестве технического кислорода $V_{\text{ТК}}$ (99,0% [O₂]), то смещение статической характеристики не учитывалось.

В случае необходимости смещение статической характеристики (8) в рабочей программе предусмотрено в виде уравнения

$$P_{\text{пд}}(Q_{\text{пг}}, \tau) = P_{\text{пд}}(Q_{\text{пг}} \pm \alpha \tau) \pm \beta \tau, \tag{9}$$

где α , β – соответственно скорости горизонтального и вертикального дрейфа статической характеристики оптимизируемого процесса.

В общем случае горизонтальная и вертикальная составляющие скоростей дрейфа могут быть заданы любыми соответствующими реальным условиям функциями времени.

Расчетные траектории поискового режима системы оптимизации управления подачей природного газа при указанных условиях представлены на рис. 3.

На рис. 4 показан пример определения показателей эффективности поискового режима $\Delta Z_{\text{п}}$, A_X , A_Z . Время поиска оценивается как интервал времени от начала поиска (из точки A) до момента прерывания поиска в окрестности экстремума (точка B). В рассматриваемом случае остановка поиска на заданное время $\Delta t_{\text{пп}} = 900$ мин произошла после пятого шага через $5 \cdot 600 = 50$ ч от начала поиска.

В точке B после выполнения условия $U(\tau) = 0$ параметр $Z(X_i)$ изменяется по траектории BC при $X_i = \text{const}$ за время $\Delta t_{\text{пп}}$. В точке C по истечении $\Delta t_{\text{пп}}$ осуществляется принудительный поворочный реверс направления поиска (см. рис. 4). Величина $Z(X_i)$ начинает уменьшаться, но на первом шаге оказывается меньше, чем $\Delta Z_{\text{н}}$, и совершается второй шаг в избранном направлении. Это приводит к заметному отклонению $Z(X_i)$ и очевидному реверсу в точке D при выполнении условия $U(\tau) = -1$.

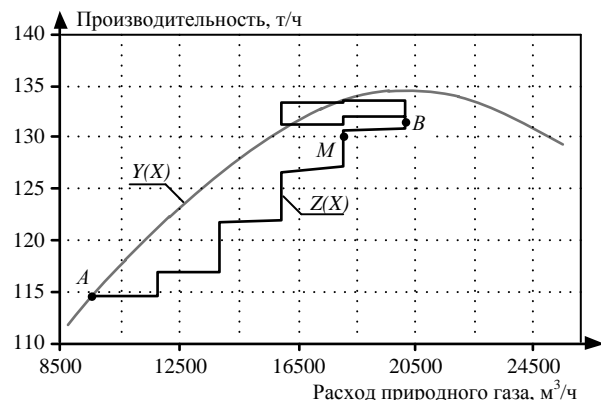


Рис. 3. Расчетные траектории поискового режима при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь в обычном масштабе

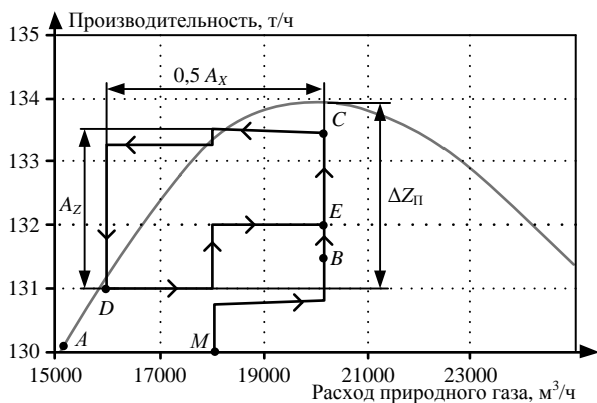


Рис. 4. Расчетные траектории поискового режима при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь в увеличенном масштабе

После реверса оптимизируемый параметр $Z(X_i)$ по траектории DE возвращается на регламентируемую траекторию EC , параметры которой являются результирующими значениями $\Delta Z_{П}$, A_X , A_Z .

Эффективность предлагаемого метода поиска экстремума при смещении статической характеристики проверена при физическом моделировании поискового режима на универсальном компьютеризированном стенде [17], конструкция которого соответствует техническому и программному обеспечению рассматриваемого метода и условиям работы в производственных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования работы системы оптимизации управления расходом природного газа можно сделать следующие выводы.

Увеличение продолжительности паузы между управляющими импульсами больше чем на $T_Э = T_0 + \tau_3$ не целесообразно, так как не приводит к заметному улучшению итоговых показателей, но одновременно приводит к увеличению времени выхода процесса в окрестности экстремума.

Уменьшение шага управляющего воздействия ΔX не оказывает заметного влияния на показатели качества, но приводит к снижению времени выхода на экстремум.

Увеличение шага управляющего воздействия приводит к пропорциональному увеличению A_X и возникновению возможности нежелательного периодического изменения оптимизируемого параметра $Z(X_i)$.

Величина удельного количества природного газа оказывает влияние одновременно и на величину удельного количества потребляемого дефицитного дорогостоящего кокса, минимизируя его потребление за счет альтернативной замены, как источника тепловой энергии.

Причем статическая характеристика зависимости удельного количества кокса V_K от удельного количества природного газа $V_{ПГ}$ [6, 14] также имеет экстремальный вид и доступна для оптимизации управления подачей природного газа с целью снижения удельного количества кокса при использовании предлагаемого метода адаптивного поиска.

Для исключения взаимовлияния одновременной работы двух оптимизирующих подачу природного газа

систем следует регламентировать их работу в зависимости от реальных производственных условий. Это безусловно повысит эффективность управления доменным процессом, обеспечивая максимальную производительность и повышенную экономическую эффективность этого процесса.

Реализованный адаптивный метод управления параметром технологического процесса учитывает значительную инерционность процесса выплавки чугуна (5-10 ч) и запаздывание (1,0-2,5 ч) при существенной нелинейности технологических связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровизация производства чугуна: состояние, научные проблемы и перспективы развития / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. С. 23-31.
2. Система поддержки принятия решений по управлению тепловым состоянием доменной плавки / Ю.С. Семенов, А.Л. Подкорытов, Е.И. Шумельчик, В.В. Горупаха, И.Ю. Семион, А.Ю. Оробцев // Сталь. 2021. № 4. С. 7-11.
3. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д. Некоторые аспекты состояния и перспектив технологии доменной плавки на примере печей «Криворожстали» // Металлург. 2014. № 4. С. 41-57.
4. Новый уровень управления доменной плавкой в разработках ИЧМ / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 11. С. 1231-1237. doi: 10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236.
5. Семенов Ю.С. Разработка и реализация новых подходов к диагностике и управлению доменной плавкой // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 2. С. 123-132. doi: 10.32339/0135-5910-2020-2-123-131.
6. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 37-44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44.
7. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов, А.В. Павлов, М.А. Семеник, В.А. Бегинюк // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 1(14). С. 26-26.
8. Интенсификация работы доменных печей путем оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишинограев, А.А. Полинов, В.П. Гридасов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2011. №6(1338). С. 16-23.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2009. 198 с.
10. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Б.Н. Парсункин, Б.К. Сеничкин, С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 69-73.

11. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева / С.А. Фещенко, В.И. Плешков, Б.Н. Лизунов, А.А. Лапшин, К.Н. Солейко, В.Н. Логинов, Л.Е. Васильев // *Металлург.* 2007. № 11. С. 44-48.
12. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухонослова Т.Г. Автоматизация и оптимизация управления процессом выплавки чугуна в доменных печах: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 215 с.
13. Сеничкин Б.К., Бахчиев Н.Ф., Гостенин В.А. Энергетическая эффективность вдуваний в доменную печь природного и коксового газов // *Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века: Всерос. сб. науч. тр.* Магнитогорск: МГМА, 1996. Т 2. 198 с.
14. Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
15. 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.
16. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия, 1973. 190 с.
17. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
18. Парсункин Б.Н., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления производством шихтовых компонентов в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 199 с.

Поступила в редакцию 10 февраля 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ADAPTIVE SEARCH-DYNAMIC CONTROL OF NATURAL GAS SUPPLY IN BLAST FURNACE

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>

Tatiana G. Sukhonosova

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, tgobuhova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1024-1612>

The productivity of a modern blast furnace is 3–4 thousand tons per day. Keeping the blast furnace running smoothly for maximum productivity is the main concern of the process staff. Numerous factors affecting the iron smelting process disrupt the process and require the formation of compensating control actions. One of the main parameters in controlling melting in the blast mode is the supply of natural gas (NG) and oxygen (Ox) to the furnace tuyere zone. The maximum productivity of a blast furnace is achieved at different NG/Ox ratios, depending on the influence of external factors. In the work, a system of search dynamic control of the natural gas supply was developed based on the method of extreme regulation. In automatic mode, the system evaluates the change in the current productivity of the blast furnace and generates a control action on the correction of the NG/Ox ratio in the direction of maximizing the current productivity of the blast furnace. The blast-furnace process has a large inertia and delay. Taking this into account, a method of stepwise change of the control action is proposed, taking into account the process dynamic properties. The paper presents the implementation of the search algorithm and performs mathematical modeling of the search dynamic control system operation. The use of the proposed algorithm will improve the efficiency of managing the supply of natural gas to the blast furnace.

Keywords: blast furnace, pig iron process, dynamic search control, adaptive control, automatic control, control automatic optimization system, optimal control.

REFERENCES

1. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.YU., Shnayder D.A., Krasnobayev A.V., Gurin I.A. Digitalization of pig

iron production: state, scientific problems and development trends. *Trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novokuznetsk, 14 aprelya 2021 goda "Modelirovaniye i naukoymkiye informatsionnyye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh"* [V International Scientific and Practical Conference "Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems"]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2021, pp. 23-31. (In Russian)

2. Semenov Y.S., Podkorytov A.L., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., Semion I.Yu., Orobtssev A.Yu. Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Stal [Steel]*, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 261-266. doi: 10.3103/S0967091221040094 (In Russian)
3. Donskov E.G., Lyalyuk V.P., Donskov A.D. Use of the blast furnaces at Krivorozhstal to illustrate the prospects of blast-furnace smelting and certain aspects of its current state. *Metallurg [Metallurgist]*, 2014, vol. 58, no. 3-4, pp. 256-263. doi: 10.1007/s11015-014-9898-y (In Russian)
4. Muravyeva I.G., Togobitskaya D.N., Nesterov A.S., Ivancha N.G. A new level of blast furnace control in the developments of the IFM. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 11, pp. 1231-1237. doi: 10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236 (In Russian)
5. Semenov YU.S. Elaboration and realization of new approaches to diagnostic and control of blast furnace heat. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific,

- Technical and Economic Information], 2020, vol. 76, no. 2, pp. 123-132. doi: 10.32339/0135-5910-2020-2-123-131 (In Russian)
6. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Selivanov V.N., Chernov V.P. Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchange stage. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 37-44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44 (In Russian)
 7. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A., Pavlov A.V., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. Stabilization of the natural gas to blast ratio in blast furnace tuyeres. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The Theory and process engineering of metallurgical production], 2014, no. 1(14), pp. 26-26. (In Russian)
 8. Gostenin V.A., Pishnograev S.N., Chevychelov A.V., Polinov A.A., Gridasov V.P. Intensification of the operation of blast furnaces through the optimal ratio of natural gas and oxygen consumption. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2011, no. 6(1338), pp. 16-23. (In Russian)
 9. Parsunkin B.N., Andreyev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Optimization of process control in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2009. 198 p. (In Russian)
 10. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreyev S.M., Ryabchikov M.YU. Blast furnace performance improvement by means of automatic control optimization of natural gas and technical oxygen submission in blasting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 69-73. (In Russian)
 11. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N., Lapshin A.A., Soveiko K.N., Loginov V.N., Vasilyev L.E. Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, vol. 51, no. 11-12, pp. 605-611. doi: 605-611 10.1007/s11015-007-0110-5 (In Russian)
 12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya protsessomvy plavki chuguna v domennykh pechakh*. [Automation and optimization of the process control of iron smelting in blast furnaces]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2018. 215 p. (In Russian)
 13. Senichkin B.K., Bakhcheev N.F., Gostenin V.A. Power efficiency of natural and cooking gas inflation in a blast furnace. *Problemy razvitiya metallurgii Urala na rubezhe XXI veka: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of development of Ural metallurgy on the boundary of the XXI century]. Magnitogorsk, NMGMA Publ., 1996, vol. 2, pp. 198. (In Russian)
 14. Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii* [Systems of automatic optimization]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 288 p. (In Russian)
 15. 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)
 16. Frer F., Ortenburger F. *Vvedeniye v elektronnyuyu tekhniku regulirovaniya* [Introduction to electronic control technology]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 190 p. (In Russian)
 17. Andreyev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa* [Optimization of control modes of heating through-type furnaces]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2013. 376 p. (In Russian)
 18. Parsunkin B.N., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya proizvodstvom shikhtovykh komponentov v metallurgii* [Automation and optimization of burden stock production management in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2020. 199 p. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г. Адаптивное поисково-динамическое управление подачей природного газа в дутье доменной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 40-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-40-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-40-46)

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. Adaptive Search-Dynamic Control of Natural Gas Supply in Blast Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 40-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-40-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-40-46)