

От редакции

В рамках научной школы МГТУ им. Г.И. Носова «Математическое моделирование тепловых, гидродинамических процессов и автоматизация металлургического производства» при непосредственном участии А.Г. Бутковского было создано и развито научное направление по оптимальному управлению технологическими процессами в металлургии. Первым руководителем этого направления в МГМИ стал д-р техн. наук Рябков В.М. В исследовании активное участие принимали д-р техн. наук, Девятков Д.Х., Парсункин Б.Н., канд. техн. наук, Трубицын Г.В., Сотников Г.В. и др. После образования двух новых кафедр – промышленной кибернетики и систем управления (ныне автоматизированных систем управления) и вычислительной техники и прикладной математики (ныне вычислительной техники и программирования) появились два направления развития систем оптимального управления распределенными технологическими процессами (д-р техн. наук, Парсункин Б.Н.) и математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов для металлургического производства на основе современных методов (д-р техн. наук, Девятков Д.Х.). Создано Магнитогорское отделение РУО Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. За комплекс работ по автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии в 2013 году Президиум РУО АИН им. А.М. Прохорова наградил пятерых членов научного направления медалями им. В.Е. Грум-Гржимайло (Парсункин Б.Н., Ячиков И.М., Логунова О.С., Ахметов У.Б., Андреев С.М.).

УДК 681.51+62-69

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ ЛИСТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Андреев С.М.¹, Парсункин Б.Н.¹, Ахметов Т.У.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия² НПО «Автоматика», г. Магнитогорск, Россия

Аннотация. Методические печи листопрокатных станов горячей прокатки представляют собой многозонные нагревательные устройства проходного типа, в которых одновременно протекает несколько взаимосвязанных высокотемпературных процессов. Необходимость учета взаимовлияния процессов друг на друга вносит дополнительные требования к реализации контуров управления отдельными параметрами процесса. Необходимость учета взаимовлияния процессов особенно актуально стоит при использовании оптимизирующих контуров управления, так как это влияние проявляется в смещении статических характеристик оптимизируемых процессов из-за действия вносимых в процесс возмущений со стороны других контуров управления. Целью работы является разработка и исследование поведения системы оптимизации управления основными технологическими параметрами нагревательной печи при наличии значительных возмущений со стороны стабилизирующих контуров при смене режимов работы нагревательной печи. В результате проведенных исследований была разработана структура оптимизирующей системы управления, реализующей энергосберегающий режим работы нагревательной печи. Результаты моделирования работы разработанной системы показали, что система управления успешно реализует энергосберегающие режимы работы нагревательной печи в условиях значительных возмущений со стороны стабилизирующих контуров управления.

Ключевые слова: методическая печь, нагрев слывовых заготовок, энергосберегающие режимы нагрева, система оптимального управления, переходные процессы в контурах управления, автоматизированная система

Введение

Промышленное производство горячекатаных полос является крупнейшим потребителем тепловой и электрической энергии в черной металлургии. Поэтому вопросы энергосберегающего управления этим энергоемким процессом весьма актуальны [1-4].

При разработке автоматизированной системы оптимального энергосберегающего управления процессом нагрева слывовых заготовок необходимо учитывать, что в промышленных нагревательных печах одновременно может происходить несколько различных, часто тесно взаимосвязанных высокотемпературных процессов [5], которые в итоге определяют конечную температуру нагреваемых заготовок на выходе из печи [6].

Необходимость учета взаимовлияния особенно актуально стоит при использовании оптимизирующих контуров управления, так как это влияние проявляется

в смещении (дрейфе) статических характеристик оптимизируемых процессов из-за действия, вносимых в процесс возмущений, со стороны других контуров управления [5].

Разработанная автоматизированная система оптимального энергосберегающего управления нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой содержит три взаимосвязанных контура управления тепловым режимом в каждой отапливаемой зоне нагревательной печи [5, 7].

1. Контур оптимизации управления ведущим температурным параметром управляемого процесса нагрева, в качестве которого используется температура рабочего пространства в зоне печи или температура поверхности нагреваемого металла.

2. Контур оптимизации управления процессом сжигания топлива в рабочем пространстве отапливаем-

мой зоны, являющийся ведомым по отношению к контуру управления температурным режимом.

3. Контур оптимизации управления газодинамическим режимом (давлением) в рабочем пространстве всей нагревательной печи, являющийся ведомым по отношению к двум ранее названным контурам и общим для всех отапливаемых зон.

Процесс оптимизации управления сводится к определению и поддержанию такой величины управляемого процесса, которая соответствует минимально возможному текущему расходу топлива при работе основного стабилизирующего контура управления тепловым режимом.

Математическая модель взаимосвязанных контуров оптимизации управления технологическими параметрами нагрева

Структурная схема модели автоматизированной системы энергосберегающего оптимального управления тепловым режимом в рабочем пространстве каждой отапливаемой зоны нагревательной печи с целью минимизации удельного расхода топлива представлена на рис. 1.

Текущее заданное значение температурного параметра $t_z(\tau)$ формируется как оптимальная траектория системой оптимального управления в ЭВМ [4, 8].

Текущее значение используемого ведущего температурного параметра $t_f(\tau)$ (в реальных условиях этот параметр контролируется техническими средствами) аппроксимируется последовательным соединением статического звена с унимодальной экстремальной вида характеристикой $\bar{t}_F(\tau) = f[V_G(\tau), V_A(\tau)]$ и динамического инерционного звена первого порядка с постоянной времени T_0 .

Вид и положение статической характеристики определяются текущими величинами расхода воздуха $V_A(\tau)$, расхода топлива $V_G(\tau)$ и производительностью печи $D(\tau)$, определяющей текущие значения $V_G(\tau)$ и $V_A(\tau)$ по зонам нагрева в соответствии с оптимальной траекторией $t_z(\tau)$.

Величина сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ формируется элементом сравнения ЭС1 в соответствии с выражением

$$\varepsilon(\tau) = t_z(\tau) - t_f(\tau), \quad (1)$$

где $t_z(\tau)$ – заданное значение температурного параметра в соответствии с траекторией оптимального энергосберегающего режима управления нагревом, формируемой АСУТП верхнего уровня.

Сигнал рассогласования подается на вход ПИД-регулятора, который в соответствии с принятым законом регулирования и исполнительным механизмом постоянной скорости интегрирующего типа ИМ1 формирует управляющее воздействие для перемещения регулирующего клапана расхода топлива (РКТ), имеющего нелинейную расходную характеристику.

Текущее положение выходного вала ИМ1 в пределах 0-100% возможного, ограниченного конечными выключателями, хода определяется в соответствии с выражением

$$X_G(\tau) = X_0 + K_{M1} \int_0^\tau \sigma_1(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $\sigma_1(\tau) \in (-1, 0, +1)$ – знаковая переключающая функция, формируемая ПИД-регулятором, определяющая с учетом принятой зоны нечувствительности стабилизирующего контура направление текущего изменения $X_G(\tau)$; K_{M1} – постоянная скорость перемещения выходного вала ИМ1, % хода/с, определяемая технической характеристикой ИМ1; X_0 – начальное положение выходного вала ИМ1.

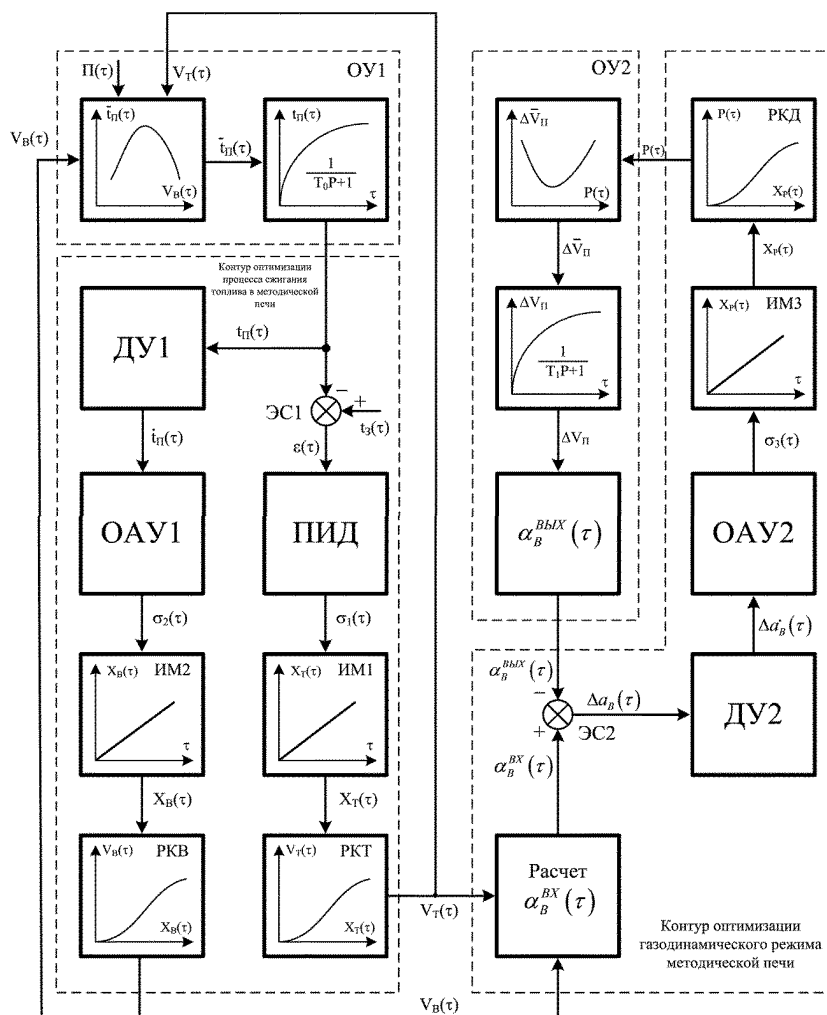


Рис. 1. Структурная схема математической модели автоматизированной системы оптимизации управления тепловым режимом в рабочем пространстве нагревательной печи

Текущее положение $X_G(\tau)$ определяется в соответствии с выражением ПИД-закона регулирования

$$X_G(\tau) = X_0 + K_G \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_i} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau + T_p \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right), \quad (3)$$

где K_G , T_i , T_p – параметры динамической настройки регулятора: соответственно коэффициент передачи, % хода/°C; время изодрома, с; время предварения.

Значения K_G , T_i , T_p соответствуют динамическим параметрам объекта управления: K_O – коэффициент передачи объекта, °C/% хода; T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционность управляемого процесса, с; τ_d – время запаздывания, с.

Связь динамических параметров настройки ПИД-регулятора с динамическими параметрами объекта управления ОУ1 определяется выражением [9]

$$K_G = \frac{T_0}{2 \cdot K_O \cdot \tau_d}; \quad T_i = T_0; \quad T_p = (0,1 \div 0,5) T_i. \quad (4)$$

Современная реализация ПИД-регуляторов с использованием микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК) позволяет использовать широтно-импульсный режим управления исполнительными механизмами (ИМ) постоянной скорости с использованием программно реализованных алгоритмов.

При широтно-импульсном режиме управления (ИМ) варьируется скважность импульсов (т.е. продолжительность управляющих импульсов и пауз между ними), что позволяет обеспечить любую меньшую по отношению к технической характеристике ИМ скорость. Величина средней скорости перемещения выходного вала ИМ при этом становится важным динамическим параметром настройки стабилизирующего контура управления в реальных условиях при цифровом управлении. Очевидно, что для управления инерционным с запаздыванием объектом управления бессмысленно использовать быстроходные исполнительные механизмы.

При настройке контура требуется соблюдать ограничения на минимальную длительность управляющего импульса. Вследствие значительной инерционности используемых в ИМ асинхронных двигателей с массивным ротором нецелесообразно при импульсном регулировании скорости ИМ устанавливать длительность управляющего импульса менее 0,12-0,15 с. При более коротком импульсе ротор просто не сможет двигаться.

Угол поворота вала ИМ1 – $X_G(\tau)$ преобразуется с учетом нелинейной расходной характеристики РКТ (поворотной заслонки) в текущий расход топлива $V_G(\tau)$.

Информационный сигнал $V_G(\tau)$, который в реальных условиях контролируется с использованием измерительных технических средств, одновременно подается в ОУ1 для определения текущего положения статической характеристики процесса сжигания топлива $\bar{f}_F(\tau) = f[V_G(\tau), V_A(\tau)]$, в блок расчета текущего значения величины коэффициента расхода воздуха на

входе печи $\alpha_B^{IN}(\tau)$ и для формирования текущего положения статической характеристики $|\Delta \bar{V}_S| = \phi[P(\tau)]$ в ОУ2. Здесь $P(\tau)$ – текущее значение величины разрежения в дымоотводящем канале печи; $|\Delta \bar{V}_S|$ – абсолютное значение величины подсосов или выбиваний в контуре оптимизации управления газодинамическим режимом ОУ2.

Оптимизирующий алгоритм управления (ОАУ1) определяет и поддерживает оптимальное текущее значение расхода воздуха в зону $V_A^{OPT}(\tau)$, при котором сжигание текущего расхода топлива $V_G(\tau)$ осуществляется с максимально возможным тепловым эффектом, т.е. с максимально возможной скоростью нагрева рабочего пространства печи или максимальной скоростью нагрева поверхности металла [7, 10-12].

Оптимизируемым (входным) параметром ОАУ1 контура управления процессом сжигания топлива является скорость изменения текущего значения контролируемого температурного параметра $dt_F(\tau) / d\tau = \dot{t}_F(\tau)$.

Оптимизирующий алгоритм управления ОАУ1 управляет движением исполнительного механизма ИМ2, перемещающего регулирующий клапан расхода воздуха РКВ в соответствии с выражением:

$$X_A(\tau) = X_{A0} + \sigma_2(\tau) \cdot K_{M2} \cdot \tau, \quad (5)$$

где $X_A(\tau)$ – текущее положение выходного вала ИМ2, % хода; $K_{M2} = \text{const}$ – величина постоянной скорости ИМ2; $X_{A0} = X_A(\tau=0)$ – начальное положение выходного вала ИМ2.

Текущее положение выходного вала ИМ2 $X_A(\tau)$ преобразуется в текущий расход воздуха $V_A(\tau)$ в соответствии с нелинейной расходной характеристикой РКВ регулирующего клапана расхода воздуха.

Для уменьшения негативного влияния инерционности процесса сжигания топлива по каналу «расход воздуха – температурный параметр» целесообразно в ОАУ1 использовать метод поиска оптимального значения расхода воздуха $V_A^{OPT}(\tau)$ по запоминанию максимума скорости изменения контролируемого температурного параметра оптимизируемого процесса, достигнутое в прошедший период времени [7, 13].

В соответствии с таким методом поиска экстремума ОАУ1 программно формирует значение переключающей функции $\sigma_2(\tau) \in (+1, -1)$ в соответствии с условием

$$\begin{aligned} &\text{если } \dot{t}_F(\tau) - \dot{t}_{F\max}(\tau-1) + \Delta \dot{t}_{Fd} \geq 0, \\ &\text{то } \sigma_2(\tau+1) = \sigma_2(\tau); \\ &\text{если } \dot{t}_F(\tau) - \dot{t}_{F\max}(\tau-1) + \Delta \dot{t}_{Fd} < 0, \\ &\text{то } \sigma_2(\tau+1) = -\sigma_2(\tau), \end{aligned} \quad (6)$$

где $(\tau-1)$, (τ) , $(\tau+1)$ – прошедший, текущий и последующий моменты времени; $\dot{t}_{F\max}$ – текущее значение

скорости изменения $t_F(\tau)$; $\dot{t}_{F_{\max}}(\tau-1)$ – максимальное значение скорости изменения $t_F(\tau)$, достигнутое в прошедший период времени; $\Delta \dot{t}_{\text{ПН}}$ – принятая зона нечувствительности ОАУ1.

Условие (6) означает, что выбранное поисковое направление изменения расхода воздуха $V_B(\tau)$ должно быть изменено на противоположное (произведен реверс ИМ2), когда текущее значение скорости изменения $t_F(\tau)$, равное $\dot{t}_F(\tau)$, уменьшится по сравнению с максимально достигнутым значением в прошедший момент времени $\dot{t}_{F_{\max}}(\tau-1)$ на величину большую, чем принятая зона нечувствительности ОАУ1.

Текущее значение $V_A(\tau)$ в реальных условиях контролируется с помощью датчиков расхода и используется в ОАУ1 для определения статической характеристики $\bar{t}_F(\tau) = f[V_G(\tau), V_A(\tau)]$ и для расчета $\alpha_B^{\text{IN}}(\tau)$ в контуре оптимизации управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве нагревательной печи.

При наличии резерва мощности дымоотводящей системы нагревательной печи во всем диапазоне изменения расходов $V_G(\tau)$ и $V_A(\tau)$ управляющим воздействием контура оптимизации управления газодинамическим режимом является текущее значение величины разрежения в дымоотводящем канале печи $P(\tau)$, определяемое положением исполнительного механизма $X_P(\tau)$, перемещающего дымовой регулирующий клапан РКД.

Контролируемым выходным оптимизируемым параметром контура оптимизации газодинамического режима является текущее значение разности коэффициентов расхода воздуха на входе и выходе рабочего пространства

$$\Delta \alpha_B(\tau) = \alpha_B^{\text{IN}}(\tau) - \alpha_B^{\text{OUT}}(\tau). \quad (7)$$

Величина $\Delta \alpha_B(\tau)$ определяет величину подсосов холодного воздуха при $\Delta \alpha_B(\tau) < 0$ или величину выбивания горячих газов из рабочего пространства при $\Delta \alpha_B(\tau) > 0$. Текущее значение $\alpha_B^{\text{IN}}(\tau)$ определяется в соответствии с выражением

$$\alpha_B^{\text{IN}}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n V_{Ai}(\tau)}{\sum_{i=1}^n V_{Gi}(\tau) \cdot L_0}, \quad (8)$$

где $V_{Ai}(\tau)$ – расход воздуха в i -ю отапливаемую зону; $V_{Gi}(\tau)$ – текущий расход топлива в i -ю отапливаемую зону, $\text{м}^3/\text{ч}$; L_0 – коэффициент, определяющий теоретическое значение количества воздуха, необходимое для полного сжигания единицы изменения расхода топлива. Для природного газа $L_0=10$; для коксового газа $L_0=5$; для доменного газа $L_0=1$, а для 1 кг мазута $L_0=11-12$.

Значение $\alpha_B^{\text{OUT}}(\tau)$ определяется по упрощенной формуле [14]

$$\alpha_B^{\text{OUT}}(\tau) = \frac{21}{21 - [O_2(\tau)]}, \quad (9)$$

где $O_2(\tau)$ – текущее содержание кислорода в продуктах горения на выходе из рабочего пространства нагревательной печи.

Текущее значение $\Delta \alpha_B(\tau)$ формируется на выходе элемента сравнения ЭС2 и используется в блоке ОУ2 для формирования статической характеристики газодинамического режима $|\Delta V_s| = \varphi_1[P(\tau)]$ (см.

рис. 1). Здесь $|\Delta V_s|$ – расчетная величина абсолютно значения объемов подсосов и выбиваний.

Предложенный способ определения зависимости $|\Delta \bar{V}_s| = \varphi_1[P(\tau)]$ основан на следующих допущениях.

1. Если нагревательная печь отапливается высококалорийным топливом, то при $\Delta \alpha_B(\tau) > 0$ с выбиваниями теряется в основном горячий воздух, объем которого в 5-12 раз больше объема топлива.

2. Определение приближенного текущего значения $|\Delta \bar{V}_s(\tau)|$ осуществляется с учетом текущего расхода продуктов сгорания в дымоотводящем канале печи в соответствии с выражением

$$|\Delta \bar{V}_s(\tau)| = K_0 \cdot V_G(\tau) \cdot \Delta \alpha_B(\tau), \quad (10)$$

где K_0 – коэффициент, численно равный объему продуктов сгорания, образующемуся при полном сгорании 1 м^3 используемого вида топлива.

Инерционные свойства ОУ2 по каналу «разность коэффициентов расхода воздуха – величина разрежения в дымовом канале» аппроксимируются инерционным звеном первого порядка с постоянной времени T_1 .

Оптимизирующий алгоритм управления ОАУ2 определяет и поддерживает оптимальное значение $P(\tau)_{\text{ОПТ}}$ (при наличии резерва по тяге), при котором величина $|\Delta \alpha_B(\tau)|$ или $|\Delta \bar{V}_s(\tau)|$ достигает минимально возможного значения за счет целенаправленного перемещения дымового клапана $X_P(\tau)$ в соответствии с выражением

$$X_P(\tau) = X_{P0} + \sigma_3(\tau) \cdot K_{M3} \cdot \tau, \quad (11)$$

где X_{P0} – начальное значение положения дымового клапана при $\tau=0$; $\sigma_3(\tau) \in (-1, +1)$ – логическая переключающая функция, определяющая текущее направление перемещения ИМ3 или величины $X_P(\tau)$; $K_{M3} = \text{const}$ – постоянная скорость ИМ3, перемещающего дымовой клапан. Перемещение дымового клапана $X_P(\tau)$ преобразуется в величину $P(\tau)$ в соответствии со статической характеристикой регулирующего клапана РКД.

При синтезе ОАУ2 для повышения оперативности работы целесообразно использовать метод поиска по

запоминанию экстремума (отрицательной скорости) изменения величины $\Delta\alpha_B(\tau)$.

ОАУ2 формирует на выходе текущее значение переключающей функции $\sigma_3(\tau)$ в соответствии с логическими условиями поиска минимального значения $\Delta\alpha_B(\tau)$ [7, 15].

$$\begin{aligned} &\text{если } \Delta\dot{\alpha}_B(\tau) - \Delta\dot{\alpha}_B(\tau-1)_{\max} - \Delta\dot{\alpha}_{Bd} \leq 0, \\ &\text{то } \sigma_3(\tau+1) = \sigma_3(\tau); \\ &\text{если } \Delta\dot{\alpha}_B(\tau) - \Delta\dot{\alpha}_B(\tau-1)_{\max} - \Delta\dot{\alpha}_{Bd} > 0, \\ &\text{то } \sigma_3(\tau+1) = -\sigma_3(\tau), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Delta\dot{\alpha}_B(\tau)$ – текущее значение скорости изменения расчетной величины $\Delta\alpha_B(\tau)$ (максимально возможной скорости уменьшения); $\Delta\dot{\alpha}_{Bd}$ – принятая зона нечувствительности ОАУ2; $(\tau+1)$, τ , $(\tau-1)$ – соответственно последующий, текущий и прошедший момент времени или циклы работы МРК.

Это означает, что выбранный в текущий момент времени τ направление изменения $X_P(\tau)$ изменится на противоположное в последующий момент времени $(\tau+1)$, если текущее значение $\Delta\alpha_B(\tau)$ увеличится по сравнению с минимально достигнутым (отрицательным) значением $\Delta\dot{\alpha}_B(\tau)_{\min}$ на величину большую, чем зона нечувствительности $\Delta\dot{\alpha}_{Bd}(\tau)$.

Текущее значение $P(\tau)$ в реальных условиях контролируется и используется в блоке ОУ2 для определения текущего значения $\Delta\dot{\alpha}_B(\tau)$ при известной статической характеристике $|\Delta V_S| = \varphi_1[P(\tau)]$.

Экстремумы статических характеристик двух оптимизируемых процессов под действием технологических возмущений смещаются (дрейфуют) по сложным траекториям, имеющим как горизонтальную, так и вертикальную составляющие скоростей дрейфа.

Результаты моделирования и выводы

В реальных производственных условиях очень редко встречаются нагревательные печи, имеющие запас по тяге при максимальных тепловых нагрузках.

Поэтому представляет практический интерес изучение взаимовлияния двух основных контуров оптимизации управления тепловым режимом в зонах нагрева:

- контура стабилизации заданного значения оптимального контролируемого температурного параметра;
- контура оптимизации управления процессом сжигания топлива.

Для проверки работоспособности программного обеспечения и оценки эффективности рассматриваемого способа оптимизирующего управления тепловым режимом рассмотрим результаты математического моделирования совместной работы двух названных контуров применительно к условиям методической печи стана 300 ОАО «ММК».

Печь отапливается коксовым газом, который подается через 12 горелок, установленных в торцевой части рабочего пространства. Для интенсификации перемешивания газа и воздуха в горелки подается небольшое количество сжатого воздуха.

Моделирование осуществлялось для условий вывода нагревательной печи из режима технологического простоя в рабочий режим при отсутствии выдачи металла. Моделирование проведено при следующих параметрах: начальное значение температуры $t_F(0)=980^\circ\text{C}$; заданное значение температуры $t_Z=1200^\circ\text{C}$; $V_G(0)=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $L_0=5$; $T_0=15 \text{ с}$; $T_1=100 \text{ с}$; $K_{M1}=100 (\text{м}^3/\text{ч})/\text{с}$; $K_{M2}=500 (\text{м}^3/\text{ч})/\text{с}$ или $1\% \text{ хода}/\text{с}$; при работе оптимизирующего контура $K_{M2}=100 (\text{м}^3/\text{ч})/\text{с}$; $K_G=0,018\% \text{ хода}/^\circ\text{C}$; $T_1=120 \text{ с}$; $\Delta t_{Fd}=2^\circ\text{C}$.

Расчетные траектории изменения $t_F(\tau)$, $V_G(\tau)$, $V_A(\tau)$ и $\dot{t}_F(\tau)$ во времени при одновременном функционировании двух контуров управления и использовании ОАУ1 по запоминанию максимума скорости изменения $\dot{t}_F(\tau)$ представлены на рис. 2.

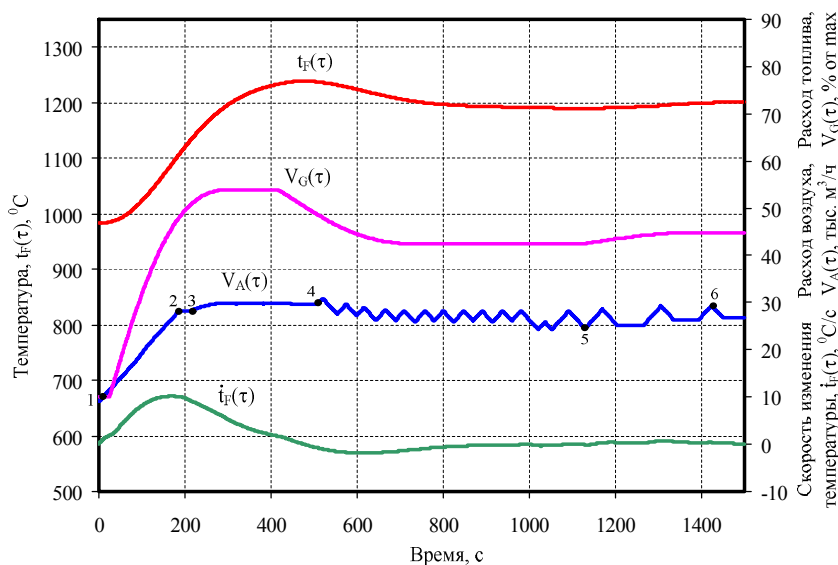


Рис. 2. Расчетные траектории изменения $t_F(\tau)$, $\dot{t}_F(\tau)$, $V_G(\tau)$, $V_A(\tau)$ во времени при выводе нагревательной печи стана 300 ОАО «ММК» из режима технологического простоя в рабочий режим

Полученные результаты согласуются с реальными данными. Это является объективным доказательством правильности рассматриваемой модели оптимального управления тепловым режимом рабочего пространства нагревательной печи. Рассмотренная модель может служить типовым элементом программного обеспечения АСУТП нагревом металла, обеспечивающей энергосберегающий режим в нестационарных услови-

ях работы нагревательных печей при переменной производительности.

Даже частичная реализация энергосберегающего оптимального управления тепловым режимом нагревательной печи за счет ограничения тепловых нагрузок в первой сварочной зоне печей стана 2500 ОАО «ММК» обеспечило реальное снижение удельного расхода условного топлива на 2-3%.

Список литературы

1. Генкин А. Л. Энергосберегающее управление современным листопрокатным производством // Производство проката. 2008. №7. С. 38-43.
2. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Requirements in energy-saving metal heating // Steel in Translation. 2002. Т. 32. №2. Р. 37-41.
3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Оптимизация управления тепловым режимом нагревательных печей // Сталь. 2003. №9. С. 65-67.
4. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Нужин Д.В. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом металла перед прокаткой в современных методических печах // Автоматизация и современные технологии. 2010. №1. С. 14-20.
5. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 18-29.
6. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Носенко О.Ю. Конструирование модели для расчета температуры низколегированных сталей при прокате на ШСГП // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №1. С. 54-57.

7. 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, 2006. 198 с.
8. Совершенствование управления режимом нагрева металла в методической печи за счет использования модели процесса / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков и др. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. 2009. №3. С. 131-149.
9. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства: монография / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов. Магнитогорск: Изд-во «Полиграфия», 2012. 406 с.
10. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Mukhina E.Y. Optimal energy-efficient combustion process control in heating furnaces of rolling mills // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State University. 2013. no. 5, pp. 58-62.
11. Сайров А.М. Оптимизация управления тепловым режимом в рабочем пространстве нагревательной печи // Автоматизированные технологии и производства. 2013. №5. С. 296-301.
12. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Обухова Т.Г. Исследование оптимального энергосберегающего процесса сжигания топлива в рабочем пространстве металлургических печей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №4. С. 28-36.
13. Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
14. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание. М.: Metallurgizdat, 1959. 400 с.
15. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2003. 267 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF BILLET HEATING ENERGY SAVING CONTROL SYSTEM IN SHEET MILL REHEATING FURNACES

Parsunkin Boris Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Academician of A.M. Prohorov Engineering Academy, Russia. Phone: 8(3519)298432. E-mail: pksu035@gmail.com.

Andreev Sergey Mihailovich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Head of Automated Control Systems department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)298527. E-mail: andreev.asc@gmail.com.

Akhmetov Timur Uralovich – Service Engineer Limited Liability Company Scientific and Production Association «Automatichesk», Magnitogorsk, Russia. Phone: 8(3519)298558. E-mail: pksu035@gmail.com.

Abstract. Reheating furnaces for hot rolling sheet mills are multi-zone heaters of a transmission type in which several simultaneous high temperature interrelated processes take place. The necessity of the account of the processes mutual influence on each other introduces the additional requirements for the control loops embodiment by separate process variables. It is of current interest especially in using optimizing control loops since this effect is evident in the shift of the statistical characteristics of the optimizing processes due to the actions brought in the process of perturbations from the other control loops.

The aim of the study is to develop and investigate the behavior of the optimization control system for the heating furnace main process variables granting the significant perturbations in the stabilizing circuits when changing the heating furnace operation modes.

As a result of carried out investigation the optimizing control system structure actualizing the heating furnace power saving mode has been developed. The results of the developed system simulation showed the effective implementation of heating furnace energy saving modes under the significant perturbations in the stabilizing control loops.

Keywords: reheating furnace, slab billet heating, energy saving heating modes, optimal control system, transients in control loops, automated system

References

1. Genkin A. L. Energoberegayushchee upravlenie sovremennym listoprokatnym proizvodstvom [Energy-saving control of modern sheet and plate production]. *Proizvodstvo prokata*. [Rolled Products Manufacturing], 2008, no.7, pp. 38-43.
2. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Requirements in energy-saving metal heating. *Steel in Translation*. 2002, vol. 32, no. 2, pp. 37-41.

3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. *Optimizatsiya upravleniya teplovym rezhimom nagrevatelnykh pechey* [Optimization of thermal control of heating furnaces]. *Stal'*. [Steel], 2003, no.9, pp.65-67.
4. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Nuzhin D.V. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya toplivosberegayushchim nesimmetrichnym nagrevom metalla pered prokatkoy v sovremennykh metodicheskikh pechakh* [Automatic control system of the fuel preserve asymmetrical metal heating before rolling in the contemporary methodological ovens]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technology], 2010, no.1, pp.14-20.
5. Andreev S.M., Parsunkin B.N. Optimal Control System of Industrial Furnace Thermal Rate. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 22-27.
6. Rumyantsev M.I., Shubin I.G., Nosenko O.Yu. Konstruirovaniye modeli dlya rascheta temperatury nizkolegirovannykh staley pri prokate na ShSGP [Designing models for calculating temperature alloy steels at the box office on the hot strip mill]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Nosov of Vestnik Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 1, pp. 54-57.
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii: monografiya* [Optimization of process control in metallurgy: a monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 198 p.
8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. Sovershenstvovanie upravleniya rezhimom nagreva metalla v metodicheskoy pechi za schet ispol'zovaniya modeli protsessa [Perfecting of control by a condition of heat of metal in a continuous furnace at the expense of use of a sample piece of process]. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v metallurgii* [Automation of technological and production processes in metallurgy]. 2009, no. 3, pp. 131-149.
9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. Akhmetov T.U. *Lokal'nye*

- stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva: monografiya* [Stabilizing local automatic control loops in industrial production: a monograph]. Magnitogorsk: Poligraphiya, 2012, 406 p.
10. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Mukhina E.Y. Optimal energy-efficient combustion process control in heating furnaces of rolling mills. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5, pp. 58-62.
 11. Sayrov A.M. Optimizatsiya upravleniya teplovym rezhimom v rabochem prostranstve nagrevatel'noy pechi [Optimization of thermal control in the working space of the heating furnace]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2013, no. 5, pp. 296-301.
 12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Obukhova T.G. Issledovaniye optimalnogo energosberegayushchego protsessa szhiganiya topliva v rabochem prostranstve metallurgicheskikh pechey [Research optimum energy-saving combustion process in the workspace metallurgical furnaces] *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 4, pp. 28-36.
 13. Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii* [Systems of automatic optimization]. Moscow: Energiya, 1977, 288 p.
 14. Linchevskiy V.P. *Toplivo i ego szhiganiye* [Fuel and fuel combustion]. Moscow: Metallurgizdat, 1959, 400 p.
 15. Parsunkin B.N., Bushmanova M.V., Andreev S.M. *Raschety sistem avtomaticheskoy optimizatsii upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Calculations the systems of automatic optimization of technological processes in metallurgy]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2003, 267 p.