

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Авторами обоснована возможность энергосберегающего управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве промышленных нагревательных печей. Выявлена расчетно-экспериментальная статическая зависимость изменения величины коэффициента расхода воздуха в зависимости от положения дымового клапана в диапазоне 10–100% открытия. Доказана эффективность энергосберегающего управления на основе использования нечеткой логики и теории нечетких множеств. Разработана структурная схема энергосберегающего нечеткого управления. Описан принцип формирования управляющего воздействия с целью автоматического управления давлением в рабочем пространстве печи с использованием принципа нечеткого управления. Рассмотрена реализация энергосберегающего нечеткого управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи камерного типа в условиях стабилизации температуры рабочего пространства путем изменения расходов доменного газа и воздуха.

Ключевые слова: энергосберегающее управление, теория нечетких множеств, управляющее воздействие, база эвристических правил, функция принадлежности.

ВВЕДЕНИЕ

Режим управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей оказывает влияние на величину удельного расхода топлива, на сохранность технологических агрегатов, на потери металла с окислением и на экологические условия производственного помещения.

Наиболее благоприятным энергосберегающим режимом автоматизированного управления давлением является режим, при котором обеспечивается минимальное значение тепловых потерь с подсосами холодного атмосферного воздуха и с выбиваниями горячих продуктов сгорания.

Общепринято управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей, отапливаемых газообразным или жидким топливом, осуществлять путем автоматической стабилизации заданного давления под сводом рабочего пространства печи в зоне выдачи выходного продукта.

Авторами работы [1] обосновано, что целесообразно и экономически выгодно осуществлять управление давлением в рабочем пространстве многозонных промышленных нагревательных печей, которые работают в условиях переменной производительности, на основании импульса давления на уровне нагреваемого металла в зоне печи, куда подается максимальное количество топлива. Положительный эффект достигается за счет повышения оперативности и целенаправленности управления при безусловном упрощении условий обслуживания отбора импульса давления.

МЕТОДЫ

Использование стабилизирующих контуров автоматического управления давлением упрощает решение задачи, но не обеспечивает независимого от субъективного влияния технолога-оператора энергосберегающего управления газодинамическим режимом рабочего пространства промышленных печей.

Энергосберегающее автоматическое управление давлением в рабочем пространстве, обеспечивающее минимальные величины подсосов и выбиваний, целесообразно осуществлять в соответствии с выполнением условия

$$\alpha_{\text{вх}}(\tau) = \alpha_{\text{вых}}(\tau), \text{ при } \Delta\alpha = \alpha_{\text{вх}}(\tau) - \alpha_{\text{вых}}(\tau) = 0, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вх}}(\tau)$ и $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ – соответственно текущие величины коэффициентов расхода воздуха на входе и выходе рабочего пространства печи.

Величина $\alpha_{\text{вх}}(\tau)$ определяется в соответствии с выражением

$$\alpha_{\text{вх}}(\tau) = \frac{V_{\text{в}}(\tau)}{(V_{\text{т}}(\tau) \cdot L_0)}, \quad (2)$$

где $V_{\text{в}}(\tau)$, $V_{\text{т}}(\tau)$ – общие, а для многозонных печей суммарные, расходы соответственно воздуха и топлива на печь; L_0 – расчетный коэффициент, определяющий численное значение количества воздуха, которое необходимо для полного сжигания единицы измерения используемого вида топлива.

Величина $\alpha_{\text{вых}}(\tau)$ определяется по упрощенной «кислородной» формуле

$$\alpha_{\text{вых}}(\tau) = \frac{21}{(21 - O_2(\tau))}, \quad (3)$$

где $O_2(\tau)$ – текущее содержание кислорода в продуктах сгорания топлива на выходе из рабочего пространства печи, %;

В условиях ограниченных возможностей дымоотводящей системы на большинстве нагревательных промышленных печей существует ограничение на реализуемость энергосберегающего управления газодинамическим режимом при максимальных тепловых нагрузках.

Величина положения дымового клапана, при котором обеспечивается соблюдение условия $\Delta\alpha(\tau)=0$, зависит от текущих расходов газа и воздуха, температуры продуктов сгорания и обеспечивается при практически нулевом давлении на уровне нагреваемого изделия или металла. Диапазон эффективного управления

газодинамическим режимом практически совпадает с рабочим диапазоном функционирования систем автоматического управления температурным режимом управления соотношением топливо-воздух [2].

При $\Delta\alpha_b(\tau) < 0$ с выбиваниями, а при $\Delta\alpha_b(\tau) > 0$ с подсосами величину объема газов $\Delta V_{II}(\tau)$ ориентировочно можно оценить в соответствии с выражением

$$\Delta V_{II}(\tau) = K_0 \cdot V_T(\tau) \cdot \Delta\alpha_b(\tau), \quad (4)$$

где K_0 – коэффициент, определяющий объем продуктов сгорания, образующийся при полном сгорании единицы измерения расхода используемого вида топлива.

СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для металлургических предприятий с полным циклом использование коксового и доменного газов вместо дорогостоящего природного для отопления промышленных нагревательных или термических печей является экономически целесообразным и выгодным.

Так, для нагревательной печи камерного типа отапливаемой смесью коксового и доменного газов статическая зависимость абсолютного значения $|\Delta V_{II}[P_p(\tau)]|$ от величины разрежения в дымоотводящем канале имеет вид

$$\begin{aligned} |\Delta V_{II}[P_p(\tau)]| = & -74503,21 + 13476,84P_p + \\ & + 140,8311P_p^2 - 124,098046P_p^3 + 5,18671P_p^4 \end{aligned} \quad (5)$$

при $10 \leq P_p \leq 16$ кг/м².

Полученная зависимость (5) имеет унимодальный экстремальный вид, и это свидетельствует о возможности и целесообразности энергосберегающего управления газодинамическим режимом путем поддержания величины $\Delta\alpha_b(\tau)$ на нулевом значении за счет изменения разрежения в дымоотводящем канале при изменении положения дымового клапана.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемой печи камерного типа, отапливаемой смесью коксового и доменного газов при постоянной температуре рабочего пространства, зависимости $P_d(\tau) = f[x_{bx}]$ имеют практически линейный вид.

Здесь $x_{bx}(\tau)$ – фиксированное постоянное положение дымового клапана в диапазоне 10÷100% открытия.

Расчетно-экспериментальная статическая зависимость $\Delta\alpha_b(\tau) = Y[x_{bx}(\tau)]$ при $\alpha_{bx}(\tau) = 1$ в условиях стабилизации температуры рабочего пространства только сжиганием доменного газа представлена на рис. 1.

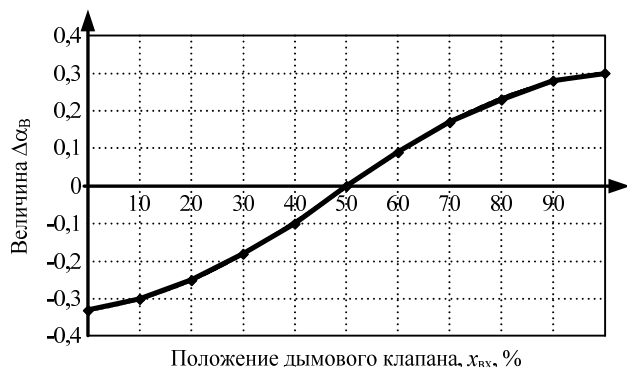


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $\Delta\alpha_b(\tau) = Y[x_{bx}(\tau)]$ для печи камерного типа при $\alpha_{bx}(\tau) = 1$

При расчете траектории изменения $\Delta\alpha_b(\tau) = Y[x_{bx}(\tau)]$ любое установившееся промежуточное значение $\Delta\alpha_b(x_i)$ определяется по методу кусочно-линейной аппроксимации

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_b(x_i) = & \Delta\alpha_{b(i)} + \frac{\Delta\alpha_{b(i+1)} - \Delta\alpha_{b(i)}}{x_{bx(i+1)} - x_{bx(i)}} \times \\ & \times [\Delta\alpha_b(\tau) - \Delta\alpha_b(i)], \end{aligned} \quad (6)$$

где $i = 1 \div n$ – количество реперных точек экспериментальной статической зависимости $\Delta\alpha_b(\tau) = Y[x_{bx}(\tau)]$; x_{bx} – текущее значение управляющего воздействия; $\Delta\alpha_b(x_i)$ – установившееся значение управляемого параметра; $i, i+1$ – номера реперных точек, для которых выполняется условие $x_i \leq x_T \leq x_{i+1}$.

При увеличении расходов газа и воздуха характеристика $\Delta\alpha_b(\tau) = Y[x_{bx}(\tau)]$ смещается вниз, и при расходах газа и воздуха, больших 3000 м³/ч, энергосберегающее управление газодинамическим режимом становится проблематичным (практически невозможным) [3].

При наличии инерционности и запаздывания, в условиях действия множества случайных факторов, наличии существенно нелинейных связей между параметрами процесса и т.д. традиционные системы автоматического управления, основанные на типовых динамических моделях, не всегда могут справляться с задачами управления. Основной причиной этого является исходное для них предположение о линейности связи между параметрами процесса, что часто не соответствует реальным условиям газодинамического режима в рабочем пространстве промышленных печей.

В таких сложных условиях для управления процессом эффективнее использовать системы автоматического управления, принцип действия которых основан на теории нечетких множеств и нечеткой логике [4, 5].

Нечеткое управление имеет преимущество перед широко используемыми типовыми системами автоматического управления за счет замены используемой упрощенной количественной линейной модели управляющей системы нелинейной многосторонней лингвистической моделью, основанной на базе формализованной имитации и обобщенно-практического опыта, формирования управляющих воздействий экспертом (лучшим технологом оператором) в различных реальных производственных ситуациях.

Принцип работы нечетких автоматических систем основан на использовании лингвистической модели, составленной из логических правил, задаваемых в форме «Каждой производственной ситуации должно соответствовать рациональное технологически обоснованное управляющее воздействие» [6].

Используя базу правил и методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно осуществлять автоматизацию и даже оптимизацию управления технологическими процессами без проведения всесторонних экспериментальных и математических исследований по созданию моделей управляемых процессов путем изменения базы логических правил управления в соответствии с изменением реальных условий [7].

Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве промышленной печи представлена на рис. 2.

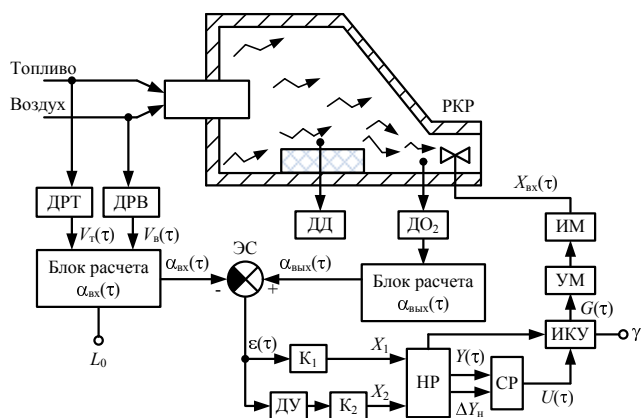


Рис. 2. Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи

Информационные сигналы пропорциональные расходам топлива $V_T(\tau)$ и воздуха $V_B(\tau)$, измеряемые соответственно датчиками расхода топлива (ДРТ) и расхода воздуха (ДРВ), подаются на вход блока расчета текущего значения $\alpha_{вх}(\tau)$ (2).

Величины текущих значений $V_T(\tau)$ и $V_B(\tau)$ определяются соответственно системами автоматического управления температурным режимом и соотношением топливо-воздух [8].

Текущее значение содержания кислорода на выходе из рабочего пространства печи $O_2(\tau)$ измеряется датчиком (ДО₂) и подается на блок расчета текущего значения $\alpha_{вых}(\tau)$ (3).

На выходе элемента сравнения (ЭС) формируется сигнал рассогласования, представляющий цель управления $\Delta\alpha_{вх} \approx 0$:

$$\varepsilon(\tau) = \alpha_{вых}(\tau) - \alpha_{вх}(\tau) = \Delta\alpha_B(\tau), \quad (7)$$

который масштабируется в блоке K_1 и дифференцируется блоком ДУ. На вход нечеткого регулятора (НР) подаются два нормированных сигнала

$$x_1 = K \cdot \varepsilon(\tau) \text{ и } x_2 = K_2 \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}. \quad (8)$$

На выходе НР с использованием алгоритма нечеткой логики формируется управляющий сигнал $Y(\tau)$, подаваемый на вход логического элемента сигнум реле (СР). На выходе СР формируется управляющий сигнал $U(\tau)$ в соответствии с условием

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(\tau) > \frac{\Delta Y_n}{2}, \\ & \text{при } \varepsilon(\tau) < 0 - \text{откр. (выбивания)}; \\ 0, & \text{если } \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right) \leq Y(\tau) \leq \frac{\Delta Y_n}{2}; \\ -1, & \text{если } Y(\tau) < \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right), \\ & \text{при } \varepsilon(\tau) > 0 - \text{закр. (подсосы)} \end{cases} \quad (9)$$

где ΔY_n – заданная зона нечувствительности системы нечеткого управления давлением.

Импульсное коммутирующее устройство (ИКУ) позволяет за счет импульсного управления с заданной скважностью γ устанавливать требуемую среднюю

постоянную скорость исполнительного механизма (ИМ) $\bar{K}_{им}$, перемещающего регулирующий клапан разряжения (РКР) в соответствии с выражением

$$x_{вх}(\tau) = x_0 + U(\tau) \cdot \bar{K}_{им} \cdot \tau, \quad (10)$$

где x_0 , $x_{вх}(\tau)$ – начальное и текущее положение регулирующего клапана РКР; $U(\tau) \in (+1, 0, -1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление движения ИМ.

Величина хода ИМ ограничена конечными выключателями в пределах 0÷100%. Контроль эффективности работы энергосберегающей системы осуществляется по показаниям датчика давления в рабочем пространстве печи (ДД) на уровне нагреваемого металла. Схема без существенных изменений может быть использована для нечеткого управления путем стабилизации этого измеряемого давления в рабочем пространстве печи. Экспериментальная статическая зависимость между содержанием кислорода в продуктах сгорания и коэффициентом расхода воздуха $\alpha_{вых}(\tau)$ при анализе продуктов сгорания на CO, CO₂, O₂ выражается уравнением

$$\bar{\alpha}_{вых}(\tau) = 0,92 + 0,11 \cdot O_2, \quad 0 \leq O_2 \leq 7\%, \quad (11)$$

при коэффициенте корреляции 0,705.

Динамические свойства инерционного с запаздыванием управляемого процесса учитываются при использовании численного метода Эйлера при решении системы уравнений [9].

$$\frac{d[\Delta\alpha_{в1}(\tau)]}{d\tau} = \frac{1}{T_0} \cdot [Y[x_{вх}(\tau)] - \Delta\alpha_{в1}(\tau)]; \quad (12)$$

$$\Delta\alpha_{в1}(\tau+1) = \Delta\alpha_{в1}(\tau) + \frac{d\alpha_{в1}(\tau)}{d\tau} \cdot (\tau); \quad (13)$$

$$\frac{d[\Delta\alpha_{в1}(\tau)]}{d\tau} = \frac{1}{\tau_3} \cdot [\Delta\alpha_{в1}(\tau) - \Delta\alpha_{в}(\tau)]; \quad (14)$$

$$\Delta\alpha_{в1}(\tau+1) = \Delta\alpha_{в}(\tau) + \frac{d\alpha_{в}(\tau)}{d\tau} \cdot (\tau). \quad (15)$$

Здесь T_0 , τ_3 – соответственно постоянные времени, количественно характеризующие инерционность и запаздывание; τ , $\tau+1$ – текущий и последующий моменты времени; $\Delta\alpha_{в1}(\tau)$, $\Delta\alpha_{в}(\tau)$ – соответственно текущее значение управляемого параметра с учетом только инерционности и запаздывания.

Формирование управляющего воздействия $Y(\tau)$ на выходе НР с использованием принципа нечеткого управления осуществляется следующим образом.

Вводятся лингвистические переменные физических нормированных предметных величин: X_1 – «рассогласование»; X_2 – «скорость рассогласования»; Y – «управляющее воздействие». Нормированные предметные величины X_1 и X_2 фиксируют по оси аргумента функций принадлежности. Нечеткое множество функций принадлежности $\mu(x_i)$ формируется с использованием выбранных технологически обоснованных функций, которые количественно характеризуют степень приближения значения предметной переменной к нечеткому множеству. Значение $\mu(x)$ фиксируются по оси функций [10].

В области определения предметной переменной X_1 использованы пять нечетких множеств $\mu(x_1)$, опреде-

ляющих значение лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности $A_i^{x_1}$: $A_1^{x_1}$ – «положительное большое»; $A_2^{x_1}$ – «положительное малое»; $A_3^{x_1}$ – «нулевое»; $A_4^{x_1}$ – «отрицательное малое»; $A_5^{x_1}$ – «отрицательное большое».

Аналогично определяем функции принадлежности $A_i^{x_2}$ для значений лингвистической переменной X_2 .

В общем случае вид функций принадлежности $\mu(x_i)$ и форма их представления может быть произвольной. Но наибольшее применение получили так называемые «стандартные» функции принадлежности: «Z» – функции; «L» – функции; «S» – функции; «П» – функции [11].

Применительно к рассматриваемому случаю, функции принадлежности нечетких множеств $\mu(x_i)$ для входных переменных представлены в работе [11].

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i при $i=1\div5$: B_1 – «положительное большое»; B_2 – «положительное малое»; B_3 – «нулевое»; B_4 – «отрицательное малое»; B_5 – «отрицательное большое» [12].

Нечеткие множества выходной лингвистической переменной представлены в виде функций $\mu^Y(x)$

$$\mu^Y(x) = \delta \cdot (x - B) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = B_i; \\ 0, & \text{если } x_i \neq B_i, \end{cases} \quad (16)$$

где величины B_i представлены в виде вектора $B_i = [1; 0,5; 0; -0,5; -1]$ при $i=1\div5$.

При формировании базы правил для реализации нечеткого управления принято основное эвристическое правило, определяющее стратегию качественного управления [13].

Это правило формулируется следующим образом:

Если возникает рассогласование $\varepsilon(\tau)$, тогда необходимо управление возмущение рассогласования. При $\varepsilon(\tau) \leq \varepsilon_n$ процесс управления считать завершённым, если это состояние соблюдается в течение заданного интервала времени. Здесь ε_n – заданная зона нечувствительности системы нечеткого управления [14].

Функционирование системы энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве промышленной печи определяется следующей базой правил:

$$\begin{aligned} R_1 : (X_1 = A_5^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_5 = -1; \\ R_2 : (X_1 = A_1^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_1 = +1; \\ R_3 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_4 = -0,5; \\ R_4 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_2 = 0,5; \\ R_5 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_5 = -1; \\ R_6 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_1 = +1; \\ R_7 : (X_1 = A_4^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0; \\ R_8 : (X_1 = A_2^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0; \\ R_9 : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_4^{x_2}) &\rightarrow Y = B_4 = -0,5; \\ R_{10} : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_2^{x_2}) &\rightarrow Y = B_2 = +0,5; \\ R_{11} : (X_1 = A_3^{x_1}) \cap (X_2 = A_3^{x_2}) &\rightarrow Y = B_3 = 0. \end{aligned}$$

Каждое правило может быть технологически и лингвистически обосновано следующим образом.

R_1 : «Если скорость рассогласования практически нулевая и возникло большое отрицательное рассогласование $\alpha_{\text{вх}}(\tau) > \alpha_{\text{вых}}(\tau)$, то на выходе нечеткого регулятора должно быть сформировано управляющее воздействие в направлении открытия дымового клапана «положительное большое» для устранения значительного выбивания продуктов сгорания».

При формулировке базы правил обязательно следует учитывать два важных обстоятельства [15]:

1. Условия формирования сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ на элементе сравнения ЭС.

2. Вид статической зависимости управляемого параметра от управляющего воздействия.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ НА КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРЕ

Рассмотрим пример формирования управляющего воздействия $Y(\tau)$ при реализации нечеткого энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи камерного типа в условиях стабилизации температуры рабочего пространства путем изменения расходов доменного газа и воздуха.

Допустим, что в начальный момент времени $\tau=0$ процесс находится в установившемся состоянии при условиях: расход доменного газа $2\,500\text{ м}^3/\text{ч}$; расход воздуха $2\,500\text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta\alpha_{\text{в}} \approx 0$; $x_{\text{вх}}(\tau=0) = 50\%$; $P_{\text{д}} \approx 0\text{ кг}/\text{м}^3$. В момент $\tau > 0$ за счет уменьшения расходов газа и воздуха до $2\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ на вход контура нечеткого управления поступит сигнал $\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0,17$.

Система управления характеризуется следующими параметрами: постоянная скорости перемещения дымового клапана $\bar{K}_{\text{им}} = 1,25\text{ \%}/\text{с}$; постоянная времени $T_0 = 2,2\text{ с}$; время запаздывания $\tau_3 = 1\text{ с}$; средний коэффициент передачи объекта (см. рис. 2) $\bar{K}_{06} = 0,0063\text{ } \Delta\alpha/\%$ хода ИМ; $K_1 = 0,3$; $K_2 = \bar{K}_{06} \cdot \bar{K}_{\text{им}} = 0,0079$; $\Delta Y_{\text{н}} = \pm 0,02$.

В соответствии с направлением изменения суммарных расходов газа и воздуха рабочая характеристика (см. рис.2) $\Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}(\tau) = Y[x_{\text{вх}}(\tau)]$ соответственно смещается по оси $x_{\text{вх}}(\tau)$ на величину $0,02\text{ \%}/(\text{м}^3/\text{ч})$ и по оси $\Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}(\tau)$ на величину $0,0063\text{ ед } \Delta\bar{\alpha}_{\text{в}}/(\text{м}^3/\text{ч})$.

Дискретность расчета переходного процесса в контуре нечеткого управления принимаем равной $0,25\text{ с}$.

При $\tau > 0$ и $\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0,17$ величина управляющего воздействия $Y(\tau)$ в контуре нечеткого управления инерционным с запаздыванием процессом определяется следующим образом:

$$\varepsilon(\tau) = \Delta\alpha_{\text{в}}(\tau) = 0 - (-0,17) = 0,17;$$

$$\frac{\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)}{d\tau} = \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} = 0; \text{ тогда}$$

$$X_1 = \frac{\Delta\alpha_{\text{в}}(\tau)}{K_1} = \frac{0,17}{0,3} = 0,57;$$

$$X_2 = \frac{0}{K_2} = \frac{0}{0,0079} = 0.$$

Используя зависимости, приведенные в [10], определяем значения функций принадлежности для каждого

нормированного предметного информационного сигнала $A_i^{X_1}$ и $A_i^{X_2}$ при $X_1=0,57$; $X_2=0$ [10].

$$A_1^{X_1} = 0,46; A_2^{X_1} = 0,9; A_3^{X_1} = 0,3; A_4^{X_1} = 0; A_5^{X_1} = 0;$$

$$A_1^{X_2} = 0; A_2^{X_2} = 0,28; A_3^{X_2} = 1; A_4^{X_2} = 0,28; A_5^{X_2} = 0.$$

Определяем уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции минимума) в соответствии с базой правил (17):

$$\begin{aligned}\mu_1^P &= \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_2^P &= \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,46; 1) = 0,46; \\ \mu_3^P &= \min(A_4^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_4^P &= \min(A_2^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,9; 1) = 0,9; \\ \mu_5^P &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_6^P &= \min(A_2^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,9; 0,28) = 0,28; \\ \mu_7^P &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_8^P &= \min(A_2^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,9; 0,28) = 0,28; \\ \mu_9^P &= \min(A_3^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,3; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{10}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,3; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{11}^P &= \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,3; 1) = 0,3.\end{aligned}\quad (17)$$

Далее определяем четкое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) в соответствии с выражением

$$Y(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R \cdot \sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P \cdot \sum_{i=1}^{11} \mu_i^P};$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y) &= 0 \cdot (1) + 0,46 \cdot (-1) + 0 \cdot (0,5) + \\ &+ 0,9 \cdot (-0,5) + 0,28 \cdot 1 + 0 \cdot (-1) + 0 \cdot 0 + 0,28 + \\ &+ 0,28 \cdot 0,5 + 0,28 \cdot (-0,5) + 0,3 \cdot 0 = -0,63; \\ \sum_{i=1}^{11} \mu_i^P &= 0 + 0,46 + 0 + 0,9 + 0,28 + 0 + 0 + \\ &+ 0,28 + 0,28 + 0,28 + 0,3 + 0 + 0,46 + 0 + \\ &+ 0,9 + 0,28 + 0 + 0 + 0,28 + 0,28 + 0,28 + \\ &+ 0,3 = 2,78; \\ Y(\tau) &= -0,23.\end{aligned}\quad (18)$$

Поскольку $-0,23 < \Delta Y_n$, то ИМ начинает движение в направлении закрытия дымового клапана.

Расчётные траектории переходного процесса системы регулирования на основе нечёткой логики представлены на **рис. 3** и **4**.

Из графика (см. **рис. 3**) видно, что время регулирования составляет $\tau_{p1}=40$ с, а значит, система управления, основанная на нечёткой логике, достаточно быстродействующая, и данная система не допускает переключения.

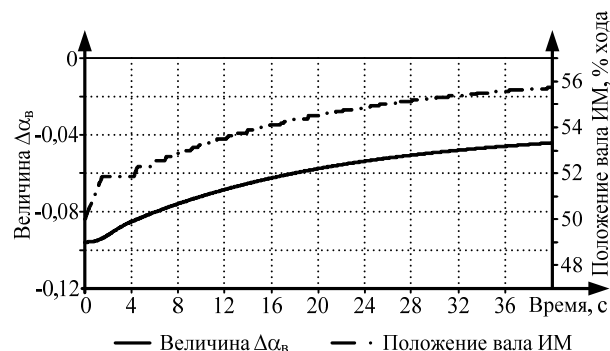


Рис. 3. Переходный процесс системы регулирования

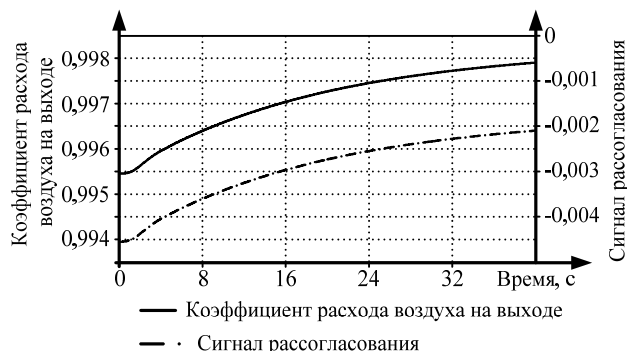


Рис. 4. Траектории изменения коэффициента расхода воздуха на выходе и сигнала рассогласования при стабилизации $\alpha_v=1,0$

Достоинством регуляторов, основанных на нечёткой логике, является не только их технологическая обоснованность, но и возможность поддержания определённой траектории выхода на рациональный режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании энергосберегающего управления давлением в рабочем пространстве печи в условиях наличия множества случайных факторов и существенной нелинейной связи между входными и выходными параметрами, построенного на основании принципов нечетких множеств и нечеткой логики, выявлены некоторые преимущества по сравнению с традиционными стабилизирующими системами управления.

К таким преимуществам относятся:

1. Технологическая обоснованность системы управления.
2. Возможность поддержания определённой рациональной траектории выхода на рабочий режим.
3. Сниженное значение величины динамической ошибки (колебательности).
4. Переходный процесс осуществляется без переключения и колебаний, что благоприятно сказывается на ресурсе исполнительного механизма перемещения дымового клапана.

Кроме того, наличие базы правил для осуществления управления с помощью методов нечёткой логики делает возможным проведение оптимизации сложных контуров управления без проведения масштабных математических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парсункин Б.Н., Дегтярёв В.В. Определение места отбора импульса для управления давлением в рабочем пространстве методических печей // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1992. №11. С. 63-65.

- Автоматическое регулирование работы регенеративных нагревательных колодцев с помощью устройства для расчета коэффициента расхода воздуха / Парсункин Б.Н., Хусид С.Е., Иванов Н.И., Слесарев А.В. // *Сталь*. 1969. №5. С.169-171.
- Флер Р., Оттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: учебн. пособие. М.: Альтекс, 2009. 197 с.
- Прикладные нечёткие системы / под ред. Тэрано Т., Асан К., Сучено К. М.: МИР, 1993. 368 с.
- Батыршин И.З. Основные операции нечёткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 102 с.
- Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2010. 408 с.
- Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №4 (36). С. 69-73.
- Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии: учеб. пособие. Магнитогорск, 2009. 267 с.
- Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 452 с.
- Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
- Моделирование управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечёткой логики / Васильев М.И., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У. // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2014. №2. С.35-45.
- Либерзон Л. М., Родов А.Б. Шаговые экстремальные системы. М.: Юрайт, 2009. 310 с.
- Syropoulos A. Theory of Fuzzy Computation. Springer, 2014. 170 p.
- Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic. Springer, 2008. 478 p.
- Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С., Ахметов У.Г. Магнитогорск: ООО «Полиграфия», 2012. 406 с.

Поступила в редакцию 09 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY EFFICIENT FUZZY PRESSURE CONTROL IN THE WORKING SPACE OF HEATING FURNACES

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automated Control Systems, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pksu035@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1822-2632>.

Mikhail I. Vasiliev

Postgraduate student, Department of Automated Control Systems, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Misha462@yandex.ru.

Natalia S. Sibileva

Postgraduate student, Department of Computer Engineering and Programming, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Natus224@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>

The authors proved the feasibility of energy saving control of the gas-dynamic mode in the working space of industrial heating furnaces. They calculated the static relationship between the change in the air flow rate and the position of the chimney valve for the valve opening range of 10 to 100%. The efficiency of the energy saving control based on making use of fuzzy logic and fuzzy-set theory was proved. The structural scheme of the fuzzy energy saving control was developed. The paper describes the principles of control design to provide the automatic control of pressure in the working space of the furnace using fuzzy control principle. The research group considered the implementation of energy saving fuzzy control of pressure in the working space of the heating furnace when the temperature in the working space stabilizes due to the change in the flow of blast furnace gas and air.

Keywords: linguistic variable, truth degree, membership functions, fuzzy sets, heuristic rules.

REFERENCES

- Parsunkin B.N., Degtyarov V.V. Defining the place of pulse sampling to control pressure in the working space of continuous furnaces. *Izvestiya vuzov «Chyornaya metallurgiya»* [Bulletin of Universities «Ferrous Metallurgy»]. 1992, no.11, pp. 63-65. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Husid S.E., Ivanov N.I., Slesarev A.V. Automatic control of regenerating soaking pit operation using the device for calculation of air flow coefficient. *Stal* [Steel], 1969, no.5, pp.169-171. (In Russian)
- Fler P., Ottenburger F. *Vvedenie v ehlektronnyuyu tekhniku regulirovaniya* [Introduction to electronic control engineering]: textbook. Moscow: Alteks, 2009. 197 p. (In Russian)
- Prikladnye nechyotkie sistemy* [Applied fuzzy systems] / Under the editorship of Tehrano T., Asan K., Sucheno K. Moscow: MIR, 1993. 368 p. (In Russian)
- Batyrsin I.Z. *Osnovnye operacii nechyotkoj logiki i ih obobshcheniya* [Basic operations of fuzzy logic and their generalization]. Kazan: Otechestvo, 2001. 102 p. (In Russian)
- Rassel, S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* [Artificial intelligence: modern approach]. Moscow: Izdatelskij dom «Vilyame», 2010. 408 p. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Ryabchikov M.YU. Blast furnace efficiency improvement by optimizing the automatic control of conventional gas and bulk oxygen supply to the blast. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4 (36), pp. 69-73. (In Russian)

8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. *Raschety sistem avtomaticheskoy optimizacii upravleniya tekhnologicheskimi processami v metallurgii* [Design of automatic optimization control systems for production processes in metallurgy]: textbook. Magnitogorsk, 2009. 267 p. (In Russian)
9. Rutkovskaya D., Pilinskij M., Rutkovskij L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechyotkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 452 p. (In Russian)
10. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh reshenij* [Definition of the linguistic variable and its application to making approximations]. Moscow: Mir, 1976. 166 p. (In Russian)
11. Vasiliev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U. Pressure control in industrial workspace furnace using the principle of fuzzy logic. *Matematicheskoe programnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Software systems in the industrial and social fields]. 2014, no. 2, pp. 35-45. (In Russian)
12. Liberzon L. M., Rodov A.B. *Shagovye ehkstremaalnye sistemy* [Step-by-step extreme systems]. Moscow: Yurajt, 2009. 310 p. (In Russian)
13. Syropoulos A. *Theory of Fuzzy Computation*. Springer, 2014. 170 p.
14. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*. Springer, 2008. 478 p.
15. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ahmetov U.G. *Lokalne stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva* [Local stabilizing circuits of automatic control in automatic control systems of industrial production processes]. Magnitogorsk: OOO «Poligrafiya», 2012. 406 p. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилева Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 63-69. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-63-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69)

Parsunkin B.N., Vasiliev M.I., Sibileva N.S. Energy Efficient 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. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-63-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69)